

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

2026, Том 18, № 2 / 2026, Vol. 18, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/87SAVN226.pdf>

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кропоткин, М. П. Усовершенствованная методика оценки сейсмического воздействия на оползнеопасные массивы, возможные защитные мероприятия / М. П. Кропоткин, Д. И. Вовкогон // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/87SAVN226.pdf>.

For citation:

Kropotkin M.P., Vovkogon D.I. An advanced methodology for assessing seismic impact on landslide-prone massifs and potential protective measures. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(2): 87SAVN226. Available at: <https://esj.today/PDF/87SAVN226.pdf>. (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

Усовершенствованная методика оценки сейсмического воздействия на оползнеопасные массивы, возможные защитные мероприятия

Аннотация. В статье представлена усовершенствованная методика оценки сейсмического воздействия на оползнеопасные массивы. Рассматриваются особенности действующих нормативных документов РФ, в которых отмечается детерминированный подход к оценке динамических нагрузок и упрощенный учет влияния рельефа местности.

Взамен автором предлагается комплексный вероятностно-детерминированный подход, объединяющий моделирование сценарных землетрясений с непрерывным учетом морфометрии рельефа. Методика ориентирована на горные, предгорные и прибрежные регионы, характеризующиеся интенсивными тектоническими движениями. Предложенная методика позволяет уточнить риски активизации оползневых процессов как при оценке сейсмостойкости эксплуатируемых сооружений, так и при проектировании новых объектов и систем их инженерной защиты, в том числе на объектах транспортной инфраструктуры. Ограничения применения включают высоту склонов от 10 до 150 метров и крутизну более 15 градусов.

Алгоритм включает трансформацию макросейсмических данных в локальные параметры на основе уравнений В.Б. Заалишвили и Ф.Ф. Аптикаева. Это позволяет рассчитать уточненное пиковое ускорение грунта и перейти к многовариантному упругопластическому моделированию устойчивости природно-техногенных склонов. Геотехнический расчет псевдостатическим методом реализуется с одновременным вводом горизонтального и вертикального коэффициентов сейсмичности на базе современных численных методов.

На основе моделирования автором сформулированы пять ключевых проектных принципов инженерной защиты. Они включают кинематическую дифференциацию, пространственное сопряжение с топографическим эффектом, учет гидродинамического фактора, геомеханическую компенсацию дефицита удерживающих сил и технико-экономическую оптимизацию. Применение этих принципов позволяет избежать избыточных запасов надежности и направлено на рациональную оптимизацию стоимости строительных работ.

Ключевые слова: сейсмоустойчивость; оползнеопасные массивы; геомеханическое моделирование; топографический эффект; пиковое ускорение грунта; инженерная защита

Введение

Сейсмогенно-инициированные оползневые процессы представляют серьезную угрозу для безопасности обширных территорий РФ, включая Северный Кавказ, Прибайкалье и Дальний Восток. Смещение оползневых масс способно не только разрушить гражданские и промышленные объекты, но и полностью заблокировать стратегические транспортные артерии. При этом действующие на территории России нормативные документы в области прогнозирования устойчивости в условиях сейсмических воздействий, к сожалению, находятся в весьма примитивном состоянии, а в некоторых аспектах имеет существенные ошибки и недостатки.

Существенный недостаток российской практики — глубокие методологические противоречия и избыточный оптимизм в оценке сейсмоустойчивости склоновых массивов (СП 269.1325800.2016 «Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила уточнения исходной сейсмической опасности и сейсмического микрорайонирования», ОДМ 218.2.006-2010 «Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог»), которые не содержат физически обоснованных механизмов учета рельефа местности и игнорируют многокомпонентную структуру сейсмического поля (в частности, обязательный ввод вертикальной составляющей ускорения). В предыдущей работе [1] критически рассмотрены существующие методы оценки влияния сейсмического воздействия на склоновые массивы, применяемые в Российской Федерации и за рубежом. Проведенный на основе многовариантного геомеханического моделирования сравнительный анализ показывает, что верификация по международным стандартам (Eurocode 8) и расчеты по методу Ньюмарка фиксируют критический дефицит удерживающих сил. Там, где отечественные методы прогнозируют условную стабильность, реальные косейсмические смещения могут превышать критические значения (от 27 до 114 см), приводя к лавинообразному разрушению. Ситуацию усугубляет детерминированный подход норм РФ: назначение единственного нормативного ускорения игнорирует логарифмически нормальный закон распределения амплитуд, что ведет к скрытой недооценке динамических нагрузок. Учет влияния рельефа на интенсивность сейсмических колебаний в действующих нормативных документах либо полностью игнорируется, либо приводится в упрощенном и неверном виде.

Для исключения рисков недооценки опасности автором был предложен комплекс подходов для уточнения устойчивости массивов с переходом к многовариантному упругопластическому моделированию [2]. Совместный учет морфометрии рельефа и стохастического распределения ускорений грунта существенно повышает точность оценки сейсмической опасности. Предложенный подход позволяет уточнить риски активизации оползневых процессов как при оценке сейсмостойкости эксплуатируемых сооружений, так и при проектировании новых объектов и систем их инженерной защиты в том числе на объектах транспортной инфраструктуры.

В данной статье представлена разработанная в развитие этого подхода авторская усовершенствованная методика оценки сейсмического воздействия на оползнеопасные массивы. В её основу заложен комплексный вероятностно-детерминированный подход, объединяющий моделирование сценарных землетрясений с непрерывным учетом морфометрии рельефа. Предлагаемый алгоритм переводит оценку устойчивости с позиций условной статической эквивалентности на уровень расчета рисков возникновения косейсмических смещений. Это обеспечивает научно обоснованный выбор конструктивных решений для защиты транспортной инфраструктуры.

Основная часть

Методика разработана для применения в рамках инженерно-геологических изысканий, проектирования новых и реконструкции существующих объектов капитального строительства на территориях с повышенной сейсмической активностью. Основным целевым назначением методики является выполнение высокоточных геоэкологических прогнозов устойчивости склонов и обоснование оптимальных параметров сооружений инженерной защиты в условиях сложного макро- и мезорельефа.

Географические и климатические условия применения

Методика ориентирована на горные, предгорные и прибрежные регионы, характеризующиеся интенсивными современными тектоническими движениями и развитием опасных сейсмогравитационных процессов. Первоочередным регионом внедрения выступает Черноморское побережье Краснодарского края (в частности, Западный Кавказ), однако математический и геомеханический аппарат инвариантен и может быть адаптирован для любых геодинамических условий со сходными типами грунтовых массивов.

Типы моделируемых объектов и инфраструктуры

Область применения включает оценку устойчивости как естественных, так и искусственно сформированных (включая зоны техногенной подрезки, выемки, насыпи) откосов и склоновых массивов. В первую очередь методика показала высокую эффективность при защите объектов линейной транспортной инфраструктуры повышенной ответственности, таких как автомобильные и железные дороги, проходящие в сложных геоморфологических условиях и подверженные косейсмическим деформациям.

Геометрические и структурно-геологические ограничения

- **Высотный диапазон:** обоснованные результаты применения расчетных уравнений топографического усиления отмечаются для склонов с вертикальной протяженностью (высотой) от 10 до 150 метров [3]. Для малых откосов ($H < 10$ м) эффекты фокусировки волн пренебрежимо малы, а на высотах более 150 метров начинают доминировать процессы поглощения и рассеяния упругой энергии, требующие иных моделей затухания.

- *Крутизна склонов:* методика применима для средних и значительных углов заложения рельефа ($\alpha > 15^\circ$), где топографический фактор вносит существенные искажения во фронт падающей волны. рассмотрение данных аспектов позволяет существенно повысить достоверность прогнозных оценок.
- *Грунтовые условия:* алгоритмы верифицированы для неоднородных дисперсных покровов (делювиально-элювиальные суглинки с крупнообломочными включениями) мощностью до 10 метров, залегающих на скальных и полускальных основаниях, включая слоистые флишевые толщи с субгоризонтальным и наклонным падением слоев.

В основу усовершенствованной методики заложен комплексный вероятностно-детерминированный подход к количественной оценке параметров внешних динамических нагрузок. Действующая нормативно-техническая база Российской Федерации, включая положения СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» и профильные ведомственные отраслевые дорожные методические документы (ОДМ), опирается на дискретные и строго детерминированные коэффициенты сейсмичности. Такой подход не учитывает стохастическую природу землетрясений, что нередко приводит к накоплению системных погрешностей и снижению достоверности геотехнических прогнозов. Предлагаемый расчетный регламент призван устранить существующий методологический разрыв между академическими геодинамическими моделями очагов землетрясений и прикладными инженерными расчетами устойчивости грунтовых массивов.

Традиционный псевдостатический метод, широко применяемый в инженерной практике, условно рассматривает сейсмическую силу как неизменную во времени статическую нагрузку, приложенную ортогонально к границам потенциального оползневого блока [4–6]. Настоящая методика преодолевает ключевые допущения и ограничения классических подходов за счет интеграции комплекса научно обоснованных факторов:

- Учет волновой специфики воздействия. Рассматриваемый подход предполагает возможность перехода от дискретных макросейсмических баллов к физическим характеристикам сейсмического импульса [7]. В качестве одного из основных расчетных параметров здесь выступает пиковое ускорение грунта (PGA), которое для полноты описания динамического процесса может быть соотнесено с преобладающими периодами колебаний и ориентировочной длительностью интенсивной фазы воздействия [8–10].
- Учет топографических эффектов рельефа. В рамках разработанного подхода важное значение имеет адаптация расчетных положений В.Б. Заалишвили к анализу взаимодействия сейсмического воздействия с геометрией склона [11]. Это позволяет детально оценить влияние морфометрических параметров массива на трансформацию волнового поля и исключить недооценку динамических нагрузок при неблагоприятных углах подхода фронта сейсмических волн [12; 13].
- Учет вероятностной изменчивости параметров. В расчетный цикл внедрены элементы вероятностного распределения параметров сильных движений грунта на основе эмпирических закономерностей Ф.Ф. Аптикаева [14]. Это позволяет корректно оценивать риски возможного превышения расчетных нагрузок в течение заданного срока эксплуатации сооружения [15; 16].

Теоретическую основу разработанной методики составляют базовые законы механики сплошных сред, положения теории предельного пластического анализа, а также концепция жесткопластического поведения грунтовых массивов в момент динамического разрушения. В рамках рассматриваемых физических допущений предполагается, что в процессе прохождения

упругой волны сквозь геометрические неоднородности рельефа (горные хребты, каньоны, уступы) возникает явление интерференции и фокусировки энергии. Данный процесс приводит к выраженному локальному усилению амплитуды колебаний по направлению от подошвы к бровке склонового массива [17; 18].

При этом грунты приповерхностной зоны и покровного чехла рассматриваются как упругопластические среды, способные накапливать необратимые пластические деформации и смещения без наступления фазы мгновенного хрупкого разрушения. Такой подход позволяет полностью отказаться от избыточно консервативной концепции абсолютной жесткости основания и перейти к более реалистичному моделированию взаимодействия сейсмической волны с дисперсными и полускальными грунтовыми толщами на основе современных методов оценки устойчивости склонов [19; 20].

Необходимый состав исходных данных

Для практической реализации разработанного расчетного регламента и построения прогностических моделей устойчивости склоновых массивов требуется формирование унифицированного, структурированного массива исходной информации. Специфика комплексного вероятностно-детерминированного подхода обуславливает необходимость одновременного привлечения параметров, характеризующих как источник потенциальной сейсмической опасности, так и внутренние геометрические и физико-механические свойства самого грунтового массива. Весь объем требуемой информации строго разделяется на три взаимосвязанных аналитических блока: сеймотектонический (макросейсмический), ландшафтно-геоморфологический и инженерно-геологический (включая динамические свойства грунтов).

Первый блок объединяет сеймотектонические и макросейсмические данные, которые определяют энергетический потенциал и кинематику проектного динамического воздействия на коренном основании. Базовым элементом данного блока выступают нормативные показатели фоновой сейсмичности района изысканий, устанавливаемые по картам Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (комплект карт ОСР-2015А, ОСР-2015В, ОСР-2015С) для различных периодов повторяемости (500, 1000 и 5000 лет соответственно). Для обеспечения долгосрочной эксплуатационной надежности объектов транспортной инфраструктуры повышенной ответственности приоритетное значение имеет карта ОСР-2015В. Для преодоления ограничений вероятностного осреднения в блок вводятся детерминированные параметры региональных сеймогенерирующих структур. К ним относятся каталоги и пространственные координаты ближайших активных тектонических разломов, линейментов и доменов с фиксацией их предельного сейсмического потенциала — максимальной магнитуды M_{max} . На основе этих данных формируются характеристики сценарного землетрясения: кратчайшее расстояние от эпицентра потенциального очага до расчетного геотехнического створа (эпицентрально-расстояние Δ , км) и глубина залегания гипоцентра (h , км). Завершают макросейсмический блок региональные калибровочные коэффициенты макросейсмического поля (коэффициент затухания b и параметр условий в очаге c), позволяющие адаптировать уравнение Н.В. Шебалина [21] под конкретные региональные условия Кавказского региона.

Второй блок включает ландшафтно-геоморфологические данные, описывающие пространственные неоднородности рельефа, которые служат причиной трансформации волнового поля [22]. Основой для морфометрического анализа может служить высокоточная цифровая модель рельефа (ЦМР) исследуемого участка, получаемая методами воздушного или наземного лазерного сканирования (LIDAR). Из ЦМР извлекаются геометрические параметры расчетных профилей: относительная и абсолютная высота склонового массива (H , м),

локальные углы наклона отдельных элементов (подошвы, средней части, бровки) и средневзвешенное заложение рельефа (α , град). При наличии в пределах участка изысканий межгорных впадин, речных долин или каньонов фиксируется ширина их дна (B) для последующей оценки резонансных интерференционных эффектов. Важным пространственным параметром является угол сочленения (экспозиция) длинной оси потенциального оползневого тела относительно простирания горного хребта и вектора подхода фронта сейсмических волн, что необходимо для корректного учета геометрической анизотропии рельефа.

Третий блок представляет собой массив инженерно-геологических, гидрогеологических и динамических параметров грунтов, слагающих расчетный створ. Здесь выполняется расчленение склона на расчетные элементы (РГЭ) с охватом стабильного основания массива. Для каждого РГЭ определяются стандартные физико-механические характеристики, включающие плотность грунта (ρ , т/м³), удельное сцепление (C , кПа), угол внутреннего трения (ϕ , град), модуль деформации (E , МПа) и коэффициент Пуассона (ν). В случае присутствия скальных и полускальных пород собираются данные о характере их трещиноватости: индекс геологической прочности массива (GSI), константу неискаженной скальной породы (m_i) и предел прочности породы на одноосное сжатие (R_c , МПа). Гидрогеологические условия описываются положением установившегося уровня грунтовых вод (УГВ) и прогнозными диапазонами его сезонного колебания, что важно для оценки динамического взвешивания и гидродинамического давления. Особое внимание уделяется геофизическим свойствам: скоростям распространения поперечных (V_s) и продольных (V_p) сейсмических волн в каждом слое, а также показателям средневзвешенной сейсмической жесткости приповерхностных грунтов, которые служат основой для вычисления локальных приращений интенсивности.

Уточнение исходной сейсмичности района исследования

Процедура уточнения параметров исходного сейсмического воздействия занимает важное место в разработанной методике. Действующая нормативная практика, опирающаяся исключительно на детерминированные балльные оценки по картам Общего сейсмического районирования (ОСР-2015), не позволяет дифференцировать нагрузку в пределах конкретного склонового массива. В то же время, инженерно-геологический опыт убедительно доказывает, что в условиях горного и предгорного рельефа Черноморского побережья Кавказа фактическая интенсивность колебаний на бровке склона может существенно превышать фоновые значения за счет грунтовых аномалий и интерференционных явлений [23].

Предлагаемый расчетный регламент преодолевает этот недостаток посредством последовательной трансформации нормативных макросейсмических данных в локальные кинематические и спектральные параметры сейсмического воздействия.

Начальным этапом алгоритма является пространственная привязка исследуемого объекта и установление нормативной фоновой балльности. На основе точных географических координат участка изысканий по комплекту карт ОСР-2015 определяется базовая сейсмическая интенсивность для средних грунтовых условий, соответствующих II категории по сейсмическим свойствам согласно СП 14.13330. Для объектов линейного транспорта повышенной ответственности (мостовые переходы, тоннельные порталы, глубокие выемки) в качестве нормативного базиса принимается карта ОСР-2015В, характеризующаяся 1000-летним периодом повторяемости и 10%-й вероятностью превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет.

Полученное дискретное значение балльности (I_0) служит отправной точкой для всех последующих дифференцированных расчетов, однако оно отражает лишь осредненную региональную картину сейсмической опасности без учета специфики локального рельефа.

Для минимизации погрешностей вероятностного осреднения и перехода к физически обоснованным параметрам воздействия на втором шаге выполняется детерминированное моделирование макросейсмического поля от конкретного критического сейсмогенерирующего линеамента. Расчет интенсивности (I) на уровне кровли коренных (недеформируемых) пород осуществляется с использованием уравнения Н.В. Шебалина [21], адаптированного под геодинамические условия района изысканий (1):

$$(I = b \cdot M - v \cdot \log \sqrt{\Delta^2 + h^2} + c). \quad (1)$$

В данной зависимости в качестве входных параметров выступают максимальная магнитуда потенциального очага (M), кратчайшее расстояние от эпицентра до расчетного геотехнического створа (эпицентральное расстояние (Δ , км) и глубина гипоцентра землетрясения (h , км). Эмпирические коэффициенты уравнения (b , c , v) представляют собой калибровочные параметры макросейсмического поля, численные значения которых принимаются на основе региональных сейсмологических каталогов и исследований затухания для конкретной территории. Этот шаг позволяет получить непрерывное, а не дискретное значение сейсмического давления, привязанное к геометрии конкретной фокальной зоны.

Третий шаг направлен на учет влияния верхней части геологического разреза, способной как демпфировать, так и резонансно усиливать упругие колебания. Для этого вычисляется средневзвешенная сейсмическая жесткость дисперсных приповерхностных отложений, залегающего выше кровли скального основания. Расчет производится по формуле (2) согласно положениям СП 269.1325800.2016:

$$\rho V_s = \frac{\sum (\rho_i V_{si}) \delta_i}{\sum \delta_i}, \quad (2)$$

где:

ρ_i — плотность i -го инженерно-геологического слоя (т/м³);

V_{si} — скорость распространения поперечных сейсмических волн в нем (м/с);

Δ_i — мощность соответствующего слоя (м) [24].

На основе полученного средневзвешенного значения жесткости по классическому уравнению сейсмического микрорайонирования вычисляется локальное грунтовое приращение интенсивности $\delta I_{гр}$ (3):

$$\delta I_{гр} = 1,67 \cdot \lg \left(\frac{\rho_0 V_{s0}}{(\rho V_s)_{гр}} \right), \quad (3)$$

В качестве эталона ($\rho_0 V_{s0}$) здесь выступают нормативные параметры средних грунтов II категории. Полученная величина $\delta I_{гр}$ позволяет скорректировать сценарную балльность с учетом литологического строения конкретного склона.

Необходимо отметить, что в условиях близкого залегания прочных скальных или полускальных пород основания средневзвешенная жесткость массива часто превышает эталонные значения, что математически приводит к отрицательным величинам грунтового приращения ($\delta I_{гр} < 0$). Данная нормативная особенность стандартного метода сейсмического микрорайонирования (СМР) может приводить к необоснованному расчетному занижению сейсмической опасности, что предопределяет необходимость обязательного сопряжения литологического фактора с геометрическими эффектами рельефа на последующих этапах алгоритма.

Четвертый шаг является наиболее важным с точки зрения преодоления ограничений стандартных подходов и компенсации занижения расчетной интенсивности, вызванного жесткостью основания. Для непрерывного математического описания процессов фокусировки и интерференции сейсмической энергии в теле геометрически неоднородного рельефа рассчитывается локальное топографическое приращение балльности (ΔJ_3) на основе модифицированного подхода В.Б. Заалишвили (4) [25]:

$$\Delta J_3 = 0,71 + 0,53 \log (\alpha \cdot H) + K \quad (4)$$

В данном расчетном уравнении α представляет собой средний угол наклона исследуемого склонового профиля (в градусах), H — относительную высоту расчетной точки над подошвой склона (в метрах), а K — эмпирический литологический коэффициент, отражающий степень связи рельефа с типом слагающих его грунтов. Введение литологического коэффициента непосредственно в топографическую формулу компенсирует нормативный дефицит надежности предыдущего шага, позволяя комплексно оценить геодинамический отклик массива [26].

Физическая и математическая связь между свойствами грунтов и геометрией массива реализуется через сопряженное алгебраическое сложение при определении итоговой уточненной сейсмической интенсивности (I_{ym}) (5):

$$I_{ym} = I + \delta I_{ep} + \Delta J_3 \quad (5)$$

В рамках предложенного сопряженного подхода положительный топографо-литологический эффект (ΔJ_3), учитывающий через коэффициент K состояние приповерхностной толщи, компенсирует отрицательное значение приращения по сейсмической жесткости глубинного основания. Это позволяет исключить риски занижения динамического давления при критической ориентации волнового фронта и получить непрерывное распределение истинной сейсмической нагрузки по всему профилю оползнеопасного склона.

Заключительный шаг алгоритма переводит полученные балльные оценки в плоскость физических кинематических величин, необходимых для геотехнического моделирования. По итоговому дробному значению интенсивности (I_{ym}) в соответствии с корреляционными зависимостями государственных стандартов, в частности ГОСТ Р 57546- 2017 «Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности», вычисляется амплитуда максимальных пиковых ускорений грунта (PGA), выражаемая в долях единицы ускорения свободного падения. Рассматриваемый подход предполагает возможность перехода от дискретных макросейсмических баллов к физическим характеристикам сейсмического импульса, где в качестве одного из основных расчетных параметров выступает пиковое ускорение грунта PGA . В целях повышения прогностической силы методики полученные базовые параметры PGA и сопутствующей длительности воздействия подвергаются обязательной калибровке на основе методологического подхода Ф.Ф. Аптикаева [14; 27]. Интеграция данных эмпирических закономерностей позволяет уйти от жестко фиксированных средних величин и ввести в расчетный цикл функцию плотности вероятности распределения амплитуд сильных движений грунта, а также учесть истинную длительность фазы интенсивных колебаний как функцию от магнитуды очага и расстояния (табл. 1) [28]. Полученное вероятностное значение PGA выполняет роль главного масштабного множителя динамического процесса.

В качестве рекомендуемого расчетного элемента методики, предназначенного для ответственных геотехнических прогнозов, на основе полученного значения PGA и с учетом установленного для конкретного района изысканий преобладающего периода колебаний грунтовой толщи и спектрального состава воздействия, в специализированных программных модулях может быть сгенерирована группа расчетных синтетических акселерограмм.

Таблица 1

**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
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
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
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
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
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
0,50	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28	44	70	110	175	280	440	700
0,70	1,45	2,3	3,7	5,8	9,2	14,5	23	37	58	92	130	210	330	515	820
0,84	1,96	3,1	5	7,8	12,4	19,6	31	50	78	125	165	260	395	620	990
0,90	2,3	3,7	5,9	9,2	14,8	23	37	59	92	145	185	295	445	695	1110
0,95	2,9	4,6	7,4	11,6	18,4	29	46	74	115	185	220	350	505	790	1260
0,98	3,7	5,9	9,6	14,8	24	37	59	94	145	235	260	415	600	940	1500

Составлено авторами

Временная протяженность генерируемых сигналов в таком случае устанавливается не менее 10 секунд, а фаза наиболее интенсивных колебаний должна охватывать не менее 5–6 секунд. Формирование подобного многовариантного пакета входных сигналов, полностью адаптированных под вероятностные критерии непревышения амплитуд, является крайне желательным при моделировании сложных грунтовых массивов для выполнения прямых динамических расчетов устойчивости».

Расчет устойчивости склонов в условиях сейсмического воздействия

Расчетный комплекс геомеханического моделирования в рамках разработанной методики реализуется в увязанной двухэтапной постановке, при которой аналитические методы предельного равновесия дублируются численным моделированием методом конечных элементов во избежание субъективных ошибок аппроксимации. На первом этапе в единую координатную среду расчетных программных комплексов переносятся данные о геометрии склона и пространственных границах расчетно-геологических элементов. Назначение реологических параметров сред осуществляется с использованием упругопластических моделей поведения грунтов. Для дисперсных разновидностей поверхностного чехла применяется классический критерий прочности Мора-Кулона, а для трещиноватого скального и полускального основания — обобщенный критерий Хоека-Брауна, учитывающий индекс геологической прочности массива и константу неискаженной породы. В рамках рассматриваемых физических допущений предполагается, что в процессе прохождения упругой волны сквозь геометрические неоднородности мезорельефа возникает явление интерференции и фокусировки энергии, приводящее к выраженному локальному усилению амплитуды колебаний по направлению от подошвы к бровке склонового массива. Данный волновой эффект топографического усиления на неоднородностях рельефа детально изучен теоретическими и экспериментальными методами геодинамики [29]. При этом грунты приповерхностной зоны и покровного чехла рассматриваются как среды, способные накапливать необратимые пластические деформации без наступления фазы мгновенного хрупкого разрушения. Это подтверждается современными концепциями нелинейной механики грунтов при циклических и динамических воздействиях [30]. Такой подход позволяет перейти от условных схем к физически обоснованному моделированию взаимодействия сейсмической волны с гетерогенными грунтовыми толщами.

В рамках следующего расчетного шага проводится вычисление коэффициента устойчивости склона в условиях естественного статического равновесия. Процедура реализуется посредством алгоритма последовательного снижения прочностных характеристик на основе оптимизации верхней и нижней границ пластического разрушения в сочетании с автоматизированным итерационным поиском критической поверхности смещения произвольной формы. Для исключения влияния граничных условий и устранения краевых эффектов нижняя граница расчетной схемы опускается на глубину залегания недеформируемых коренных пород, охватывая заведомо стабильное основание склона и предотвращая искажения напряженно-деформированного состояния в зоне потенциального оползневого сдвига. Далее реализуется псевдостатический расчет, при котором к центрам тяжести конечных элементов или расчетных отсеков прикладывается квазистатическая инерционная нагрузка, направленная в наиболее неблагоприятную сторону — наружу откоса.

Определяющим элементом усовершенствованного псевдостатического подхода является вычисление уточненного горизонтального коэффициента сейсмичности ($K_{c,гор}$). В отличие от традиционных жестко фиксированных нормативных коэффициентов, в рамках разработанной методики значение ($K_{c,гор}$) рассчитывается непосредственно на основе полученного на предыдущем шаге вероятностного пикового ускорения грунта (PGA), скорректированного с учетом рельефа и затухания, по следующей формуле (6):

$$K_{c,гор} = 0,5 \cdot \frac{PGA_{ут}}{g}, \quad (6)$$

где:

$PGA_{ут}$ — уточненное пиковое ускорение грунта (выраженное в $см/с^2$);

g — ускорение свободного падения, $см/с^2$.

В окончательном виде формулу (6) для инженерных расчетов устойчивости склонов и дамб сформулировали и опубликовали американские ученые Хэйнс-Гриффин и Франклин (*Hynes-Griffin & Franklin*) в 1984 году [31] и официально закреплено в европейском стандарте по сейсмостойкому проектированию Eurocode 8 (EN 1998-5) для проведения псевдостатических расчетов устойчивости склоновых массивов. Использование фиксированного числового множителя 0,5 обусловлено физической необходимостью перехода от кратковременных экстремальных пиков акселерограммы к средним эффективным (действующим) ускорениям динамического процесса, на которые инертный грунтовый массив успевает отреагировать развитием пластических деформаций.

Данное математическое выражение обеспечивает прямую физическую связь между динамическими параметрами сейсмического воздействия и квазистатическими силами, прикладываемыми к грунтовым блокам в расчетных комплексах.

Интеграция вероятностного подхода Ф.Ф. Аптикаева оказывает определяющее влияние на саму структуру и алгоритм проведения геотехнических расчетов устойчивости. Вместо традиционного детерминированного вычисления одиночного коэффициента запаса для абстрактного нормативного воздействия, структура моделирования переводится на уровень многовариантного сценарного анализа (табл. 1). Поскольку подход Ф.Ф. Аптикаева вводит функцию плотности вероятности распределения амплитуд и длительностей импульса, геотехнический расчет псевдостатическим методом реализуется как серия итераций для набора вероятностных значений $PGA_{ут}$, соответствующих различным уровням обеспеченности. Это позволяет оценить устойчивость массива для широкого спектра сценариев динамического нагружения, обеспечивая многопараметрический анализ надежности склона в течение всего срока службы защищаемого объекта.

Для компенсации ограничений традиционных нормативных подходов и исключения скрытого дефицита надежности на крутых склонах, в расчетную схему псевдостатического метода параллельно вводится уточненный вертикальный коэффициент сейсмичности ($K_{с,верт}$). Его величина принимается сопряженно с горизонтальной компонентой волнового поля на основе классического соотношения ортогональных проекций ускорений [32] (7):

$$K_{с,верт} = 0,33 \cdot K_{с,гор}, \quad (7)$$

Данное пропорциональное соотношение динамических компонент сейсмического импульса также официально регламентировано европейским стандартом Eurocode 8 (EN 1998-5).

При этом расчет выполняется для наиболее неблагоприятной комбинации нагрузок, при которой горизонтальная сейсмическая сила выступает в качестве сдвигающей, а вертикальная составляющая направляется вверх, тем самым снижая прижимное усилие от веса оползневого блока и уменьшая сопротивление трению по подошве скольжения. На данном этапе фиксируется падение коэффициента устойчивости под совокупным действием сил $K_{с,гор}$ и $K_{с,верт}$, определяется глубина заложения потенциального оползневого тела и оценивается степень дефицита удерживающих сил. Основным критерием сейсмостойчивости является непревышение грунтовым массивом критического состояния, выраженное через нормативный коэффициент запаса.

При моделировании экстремальных сценариев динамического нагружения склоновых оползнеопасных массивов геотехнический прогноз может быть дополнен оценкой потенциальных смещений массива на основе жесткопластических моделей Ньюмарка, что позволяет получить вспомогательные данные для обоснования параметров сооружений инженерной защиты.

Принципы инженерной защиты

Результаты многовариантного геотехнического моделирования и итерационного сценарного анализа служат основой для выработки дифференцированных, экономически оптимизированных проектных решений инженерной защиты склоновых территорий. Реализация разработанной методики на стадии инженерной подготовки и проектирования защитных сооружений базируется на пяти ключевых принципах.

- Принцип кинематической дифференциации защитных мероприятий. Выбор конкретных типов удерживающих сооружений и противооползневых конструкций напрямую зависит от выявленного волнового сценария развития потенциального разрушения, а также от геометрических характеристик плоскости скольжения. При приповерхностных деформациях малой мощности, охватывающих преимущественно разуплотненные дисперсные грунты, проектируются гибкие системы инженерной защиты [33]. К ним относятся высокопрочные стальные противооползневые драпировочные сетки и пространственные георешетки в комплексе с анкерным полем малой длины. В случае глубоких оползневых сдвигов большой мощности, связанных с вовлечением в смещение скальных и полускальных горных пород, применяются жесткие удерживающие конструкции глубокого заложения — буронабивные сваи значительного диаметра, объединенные мощным железобетонным ростверком, пересекающие плоскость скольжения и жестко защемленные в стабильное скальное основание массива [34].

- Принцип пространственного сопряжения с топографическим эффектом. Размещение удерживающих сооружений должно осуществляться с учетом пространственной неравномерности расчетного динамического давления, вызванного трансформацией волнового поля. Прибровочная зона склонового массива, где локальные ускорения достигают максимальных значений за счет интерференционных явлений мезорельефа, требует повышенной плотности анкерного

крепления или устройства дополнительных улавливающих полок и пазух [35]. Напротив, в подошвенной части, где геометрическое усиление волн минимизировано, акцент смещается на обеспечение надежного водоотведения и устройство дренажных систем глубокого заложения [36]. Направленное конструирование элементов защиты по всему профилю массива позволяет компенсировать критическое динамическое воздействие в верхней части склона и предотвратить развитие косейсмических смещений.

- Принцип сопряжения удерживающего и гидродинамического факторов. Учитывая, что динамическое взвешивание и гидродинамическое давление в обводненных грунтах в момент сейсмического удара способны резко снизить удерживающий потенциал основания, любые удерживающие сооружения должны проектироваться совместно с системами глубокого водоотведения. В подошвенной части склона, где инерционные сдвигающие силы сочетаются с максимальным динамическим поровым давлением, наиболее эффективным признано возведение гравитационных подпорных стен из габионных ящиков [37]. Обладая высокой проницаемостью, габионные конструкции исключают возникновение порового давления и гидродинамического напора на контакте со склоном, а их гибкость позволяет конструкции деформироваться без хрупкого разрушения при знакопеременных сейсмических нагрузках [38].

- Принцип геомеханической компенсации дефицита удерживающих сил. Главным критерием успешности проектируемой инженерной защиты является достижение расчетным коэффициент устойчивости склона в условиях сейсмического воздействия нормативного значения совместном действии статических нагрузок и уточненных коэффициентов сейсмичности. Склоновый массив должен быть стабилизирован таким образом, чтобы искусственно созданный дефицит удерживающих сил полностью компенсировался несущей способностью конструкций [19]. Расчет удерживающих сооружений выполняется по наиболее неблагоприятной пространственной комбинации нагрузок, при которой вертикальная сейсмическая сила снижает прижимное усилие от веса оползневого блока, а горизонтальная сила инициирует срез, что гарантирует надежность системы в критический момент времени [39].

- Принцип технико-экономической оптимизации проектных решений. Точная верификация параметров динамического воздействия на основе сопряжения вероятностного подхода к пиковым ускорениям и топографических моделей усиления позволяет уйти от практики избыточного завышения геометрических размеров свай и анкеров «вслепую». Назначение параметров несущих конструкций (шага свай, длины заделки анкеров, толщины ростверков) выполняется дифференцированно, в строгом соответствии с расчетными значениями PGA_{ym} для каждого конкретного геологического отсека [40]. Подобный подход исключает неоправданное удорожание сметной стоимости строительных работ, минимизирует риски недооценки опасности при неблагоприятной экспозиции волнового фронта и обеспечивает научно обоснованный выбор оптимальных конструктивных решений для долгосрочного обеспечения эксплуатационной надежности объектов линейной транспортной и инженерной инфраструктуры.

-

Заключение

Разработан комплексный вероятностно-детерминированный алгоритм уточнения сейсмических воздействий на склоновые массивы, трансформирующий дискретные нормативные баллы в непрерывные физические параметры пиковых ускорений грунта. Предложенный подход компенсирует дефицит стандартных методов микрорайонирования на склоновых массивах за счет совместного учета литологии и морфометрии рельефа, что позволяет перейти к многовариантному сценарному анализу. На основе сопряжения численных и аналитических методов модернизирован комплекс геомеханического моделирования, обеспечивающий

прямую связь параметров внешнего воздействия с расчетными инерционными силами. Сформированная методика учитывает наиболее опасные комбинации горизонтальных и вертикальных сил при прохождении сейсмических волн, существенно повышая достоверность прогноза устойчивости склонов различной крутизны. Сформулированные пять проектных принципов инженерной защиты позволяют дифференцировать удерживающие мероприятия по глубине плоскости скольжения и локальным динамическим напряжениям. Данная система увязывает параметры конструкций с пространственной неравномерностью сейсмических нагрузок и гидрогеологических условий по профилю, что позволяет избежать избыточных запасов надежности при проектировании и способствует достижению технико-экономического баланса при обеспечении долгосрочной надежности объектов транспортной инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кропоткин М.П., Вовкогон Д.И. Сравнительный анализ использования различных подходов к оценке устойчивости склоновых массивов в условиях сейсмического воздействия // Инженерные изыскания. — 2023. — Т. 17, № 3. — С. 22–35. — DOI: 10.25296/1997-8650-2023-17-3-22-35.
2. Кропоткин М.П., Вовкогон Д.И. Уточнение оценки влияния сейсмических воздействий на устойчивость склоновых массивов — подходы и возникающие проблемы // Вестник Евразийской науки. — 2025. — Т. 17, № 6 (дата обращения: 18.05.2026). — DOI: 10.15862/24NZVN625.
3. Заалишвили, В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок / В.Б. Заалишвили; ответственный редактор А.В. Николаев. — Москва: Наука, 2009. — 350 с. — ISBN 978-5-02-034128-9.
4. Вознесенский, Е.А. Поведение грунтов при динамических нагрузках / Е.А. Вознесенский. — Москва: Изд-во МГУ, 1997. — 286 с.
5. Newmark, N.M. Effects of earthquakes on dams and embankments / N.M. Newmark // Geotechnique. — 1965. — Vol. 15, No. 2. — P. 139–160.
6. Terzaghi, K. Mechanism of Landslides / K. Terzaghi // Engineering Geology (Berkey) Volume. — Geological Society of America, 1950. — P. 83–123.
7. Уломов, В.И. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации (ОСР-2015) / В.И. Уломов, М.И. Богданов // Инженерные изыскания. — 2016. — № 4. — С. 42–49.
8. Seed, H.B. Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams / H.B. Seed // Geotechnique. — 1979. — Vol. 29, No. 3. — P. 215–263.
9. Jibson, R.W. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes / R.W. Jibson // Engineering Geology. — 2011. — Vol. 122, No. 1-2. — P. 130–145.
10. Bray, J.D. Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements / J.D. Bray, T. Travarasrou // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. — 2007. — Vol. 133, No. 4. — P. 381–392.
11. Заалишвили В.Б., Габеева И.Л., Мельков Д.А. Способ сейсмического микрорайонирования: Патент РФ № 2399934: заявл. 20.09.2010.
12. Миронов, О.К. Влияние топографии рельефа на параметры сейсмических колебаний склонов / О.К. Миронов // Геоэкология. — 2014. — № 5. — С. 453–461.

13. Алешин, А.С. Сейсмическое микрорайонирование и грунтовые условия / А.С. Алешин // Инженерные изыскания. — 2011. — № 8. — С. 34–39.
14. Аптикаев, Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности / Ф.Ф. Аптикаев; Российская академия наук, Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта. — Москва: Наука и образование, 2012. — 175 с. — ISBN 978-5-906235-02-2.
15. Бондаренко, Н.А. Оценка устойчивости автодорожных оползневых склонов при сейсмических воздействиях / Н.А. Бондаренко // Автомобильные дороги. — 2015. — № 4. — С. 72–77.
16. Маций, С.И. Прогноз сейсмогенных оползней на Северо-Западном Кавказе / С.И. Маций, Е.В. Безуглова // Экологические системы и приборы. — 2011. — № 8. — С. 14–19.
17. Aki, K. Quantitative Seismology / K. Aki, P.G. Richards. — 2nd ed. — Sausalito, California: University Science Books, 2002. — 700 p. — ISBN 0-935702-96-2.
18. Bard, P.-Y. The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys / P.-Y. Bard, M. Bouchon. // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1985. — Vol. 75, № 2. — P. 519–541.
19. Фоменко, И.К. Расчет устойчивости склонов с учетом сейсмического воздействия: методология оценки и прогноза оползневой опасности / И.К. Фоменко. — Москва: Наука, 2016. — 320 с. — ISBN 978-5-02-039984-7.
20. Кан, К. Вероятностный анализ устойчивости склонов при сейсмическом воздействии с использованием акселерограмм / К. Кан, О.В. Зеркаль, И.К. Фоменко, О.В. Павленко. // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2019. — № 2. — С. 2–8.
21. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. — М.: Наука, 1977.
22. Заалишвили, В.Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования / В.Б. Заалишвили; Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН. — Москва: Наука, 2009. — 363 с. — ISBN 978-5-02-036101-0.
23. Алешин, А.С. Оценка сейсмической опасности на Черноморском побережье Кавказа по грунтовым условиям / А.С. Алешин, С.А. Перетокин, М.А. Капустян. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2011. — № 4. — С. 36–42.
24. Медведев, С.В. Инженерная сейсмология / С.В. Медведев; Академия наук СССР, Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта. — Москва: Госстройиздат, 1962. — 284 с.
25. Мелков, Д.А. Оценка влияния топографии на сейсмическую интенсивность инструментальными и расчетными методами / Д.А. Мелков, В.Б. Заалишвили, А.К. Архиреева. // Геология и геофизика Юга России. — 2020. — Т. 10, № 1. — С. 102–114.
26. Фоменко, И.К. Современные подходы к количественной оценке устойчивости склонов при сейсмическом воздействии / И.К. Фоменко, В.В. Пендин, О.В. Зеркаль [и др.]. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. — 2018. — № 2. — С. 69–80.

27. Эртелева, О.О. Уравнения затухания сейсмической интенсивности / О.О. Эртелева, Ф.Ф. Аптикаев. // Геология и геофизика Юга России. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 57–70.
28. Штейнберг, В.В. Методы оценки сейсмических воздействий: В.В. Штейнберг, М.В. Сакс, Ф.Ф. Аптикаев [и др.]. // Вопросы инженерной сейсмологии. — 1993. — Вып. 34. — С. 5–92.
29. Савич, И.А. Оценка влияния топографических условий на сейсмическую интенсивность / И.А. Савич. // Физика Земли. — 1999. — № 4. — С. 45–53.
30. Шашкин, А.Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта / А.Г. Шашкин. // Развитие городов и геотехническое строительство. — 2011. — № 14. — С. 88–105.
31. Hynes-Griffin, M.E. Rationalizing the seismic coefficient method / M.E. Hynes-Griffin, A.G. Franklin. — Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1984. — 34 p. — (Miscellaneous Paper GL-84-13).
32. Seed, H.B. Design of earth retaining structures for dynamic loads / H.B. Seed, R.V. Whitman // Lateral stresses in the ground and design of earth-retaining structures. — New York: ASCE, 1970. — P. 103–147.
33. Маций, С.И. Инженерная защита территорий от оползней с применением гибких систем / С.И. Маций. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2013. — № 4. — С. 341–349.
34. Шашкин, А.Г. Проектирование удерживающих сооружений глубокого заложения на оползнеопасных склонах / А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин. // Развитие городов и геотехническое строительство. — 2021. — № 2(37). — С. 14–29.
35. Алешин, А.С. Топографический эффект при сейсмических воздействиях / А.С. Алешин, М.А. Кузнецов. // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2014. — Т. 41, № 4. — С. 15–26.
36. Пономарев, А.Б. Оценка устойчивости и методы инженерной защиты оползнеопасных склонов / А.Б. Пономарев, В.И. Клевеко. — Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2015. — 162 с. — ISBN 978-5-398-01452-5.
37. Крамаренко, В.В. Влияние порового давления на устойчивость подтопленных склонов в сейсмоактивных регионах / В.В. Крамаренко, В.А. Никитенков, М.С. Баранова. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329, № 8. — С. 118–127.
38. Гаджиев, М.А. Особенности работы гибких подпорных стен из габионных конструкций в сейсмических условиях / М.А. Гаджиев. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2021. — Т. 48, № 2. — С. 135–144.
39. Зеркаль, О.В. Оценка устойчивости оползнеопасных склонов при псевдостатическом и динамическом воздействиях / О.В. Зеркаль. // Инженерная геология. — 2020. — Т. 15, № 4. — С. 34–45.
40. Пендин, В.В. Методология оптимизации проектных решений инженерной защиты территорий от опасных геологических процессов / В.В. Пендин. — Москва: Изд-во МГРИ-РГГРУ, 2015. — 210 с.

Kropotkin Mikhail Petrovich

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

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

Vovkogan Dmitry Igorevich

Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow, Russia
Institute of Hydraulic Engineering and Power Engineering
The Complex of Urban Planning Policy and Construction of the city of Moscow, Moscow, Russia
E-mail: Dmitry.vovkogan@yandex.ru

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

An advanced methodology for assessing seismic impact on landslide-prone massifs and potential protective measures

Abstract. This article presents an improved methodology for assessing the seismic impact on landslide-prone areas. It examines the characteristics of current Russian regulatory documents, which adopt a deterministic approach to the assessment of dynamic loads and a simplified account of the influence of terrain topography.

Instead, the author proposes a comprehensive probabilistic-deterministic approach that combines the modeling of scenario earthquakes with the continuous consideration of terrain morphometry. The methodology is aimed at mountainous, foothill and coastal regions characterised by intense tectonic movements. The proposed methodology allows for a more accurate assessment of the risks of landslide activation, both when evaluating the seismic resistance of existing structures and when designing new facilities and their engineering protection systems, including transport infrastructure facilities. Limitations on its application include slope heights ranging from 10 to 150 metres and a gradient of more than 15 degrees.

The algorithm involves converting macroseismic data into local parameters based on the equations of V.B. Zaalishvili and F.F. Aptikaev. This allows for the calculation of a refined peak ground acceleration and enables the transition to multivariable elastoplastic modelling of the stability of natural and man-made slopes. Geotechnical analysis using the pseudo-static method is carried out with the simultaneous input of horizontal and vertical seismicity coefficients based on modern numerical methods.

Based on the simulation, the author has formulated five key design principles for engineering protection. These include kinematic differentiation, spatial coupling with topographical effects, consideration of hydrodynamic factors, geomechanical compensation for the deficit in retaining forces, and technical and economic optimisation. The application of these principles helps to avoid excessive reliability margins and is aimed at the rational optimization of construction costs.

Keywords: seismic stability; landslide-prone massifs; geomechanical modeling; topographic effect; peak ground acceleration; engineering protection