

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.543:470.620

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ  
СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНОВ  
(НА ПРИМЕРЕ ОСВАИВАЕМОЙ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ  
ЗАПАДНОГО КАВКАЗА)

© 2020 г. М. П. Кропоткин\*

Национальный исследовательский Московский строительный государственный университет (НИУ МГСУ),  
Ярославское шоссе, 26, г. Москва, 129337 Россия

\*e-mail: [singeos@narod.ru](mailto:singeos@narod.ru)

Поступила в редакцию 15.10.2019 г.

После доработки 15.11.2019 г.

Принята к публикации 28.11.2019 г.

Рассмотрены некоторые аспекты влияния сейсмических воздействий на устойчивость крупных сейсмогравитационных массивов. Показан пример расчета устойчивости склона с использованием раздельного учета сейсмических ускорений по блокам. Рассмотрено влияние рельефа на изменение сейсмических воздействий. Проведена оценка сравнительного воздействия продольных и поперечных сейсмических волн от очагов землетрясений, находящихся перед подножием склона и за его гребнем. Проанализированы некоторые взаимосвязи между параметрами воздействий, вызываемых сейсмическими волнами от возможного очага землетрясений (ВОЗ), и устойчивостью склонов в зависимости от взаимного планового положения сейсмических очагов и оползнеопасных участков. Определено, что вероятность значительных сейсмических воздействий продольных волн на устойчивость склонов невелика, в то время как подобная вероятность для воздействия поперечных волн, напротив, значительна.

**Ключевые слова:** Черное море, побережье, землетрясения, скальные оползни, расчет устойчивости склона

DOI: 10.31857/S086978092002006X

ВВЕДЕНИЕ

Значительные сейсмические воздействия представляют собой серьезную угрозу для зданий и сооружений, жизни и здоровья населения. Важной составляющей воздействий землетрясений являются сейсмогенные оползни и другие сейсмоиндуцированные склоновые процессы, широко развитые во многих странах мира, в том числе в ряде регионов России. Нормативные документы большинства стран требуют количественной оценки устойчивости склоновых массивов для всех значимых инженерных объектов.

При расчете устойчивости склонов и откосов и определении оползневого давления учет сейсмического воздействия осуществляется, как правило, добавлением к расчетным усилиям сейсмических сил, которые принимаются объемными. Учет сейсмического воздействия в настоящее время выполняется двумя группами методов: псевдостатическими и динамическими.

В первом случае эффект от землетрясения моделируется путем введения дополнительных

инерционных сил, задаваемых коэффициентами сейсмичности в горизонтальном и вертикальном (либо только в горизонтальном) направлениях. Сейсмическая сила раскладывается на параллельную и перпендикулярную по отношению к поверхности скольжения составляющие и геометрически складывается с соответствующими силами иной природы. В частности, этот метод рекомендуется при расчетах сейсмического воздействия (давления) грунта на подпорные стены при применении квазистатических расчетных схем, согласно п. 5.17 СП 14.13330.2018<sup>1</sup>. Чаще рассматривается только наиболее неблагоприятное направление сейсмической силы – горизонтальное и в сторону склона, в некоторых случаях рекомендуют принимать его параллельным поверхности смещения [2]. Сами расчеты устойчивости выполняются одним из методов предельного равновесия. Необходимо отметить,

<sup>1</sup> СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81. <http://docs.cntd.ru/document/550565571>

что коэффициенты сейсмичности, установленные нормативными документами России, Китая и европейских стран для одной и той же интенсивности воздействия различаются в 2–4 раза [3, 15].

В другом, ныне редко используемом, способе “фиктивного откоса” используется виртуальный поворот склона на угол, равный отклонению от вертикали равнодействующей гравитационной и сейсмической сил.

“Квазивероятностная” оценка воздействий проектного и максимального расчетного землетрясения (ПЗ и МРЗ) при расчетах мероприятий инженерной защиты (противооползневых и противообвальных сооружений) производится на основе коэффициентов сочетания нагрузок, приведенных в п. 5.2.2 СП 116.13330.2012<sup>2</sup>.

При динамическом способе учета сейсмического воздействия на устойчивость используются данные акселерограмм колебаний, что теоретически позволяет учитывать фактическую продолжительность и частотно-амплитудные характеристики землетрясений. Решение, как правило, выполняется методом конечных элементов с учетом жесткости и затухания колебаний [4]. При кажущейся гораздо более высокой достоверности этого метода он имеет специфические трудности, обусловленные необходимостью использования акселерограмм-аналогов, которые, как правило, требуется искусственно масштабировать до требуемого расчетного ускорения, либо использовать искусственные акселерограммы. К тому же степень “аналогичности”, как правило, не может быть высокой вследствие неизбежных различий между “аналогом” и объектом во взаимном положении сейсмического очага и оползнеопасного склона, геологического строения, рельефа и т.д., которые весьма сильно влияют на фактические параметры колебаний.

Как псевдостатические, так и динамические способы не учитывают влияние рельефа, различие влияния продольных и поперечных сейсмических волн, углы их прихода к склоновому массиву и взаимное плановое положение сейсмических очагов и оползнеопасных склонов.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Характерная особенность кавказских берегов Черного моря – наличие большого количества палеосейсмодислокаций, представленных крупными блоковыми оползнями и обвалами [7, 8, 10, 13], что даже отмечено в специализированных

нормативных документах<sup>3</sup>. Активизация смещений этих массивов, как и их новообразования при возможных землетрясениях, представляет большую угрозу для активно осваиваемой прибрежной зоны, где возводятся объекты курортного назначения, автодороги, терминалы крупных трубопроводов, объекты контроля воздушного и морского пространства и т.д.

Одним из участков с активным развитием очень крупных и гигантских (до 2 км) смещенных блоковых массивов является полуостров Абрау (рис. 1).

В качестве типового участка выбран массив, на котором выявлен скальный оползень сдвига длиной (по падению) 160 м, шириной около 700 м. Мощность его изменяется от 20 до 60 м, уменьшаясь вниз по склону. Язык оползня срезан активным клифом, высота которого достигает 30 м. Разрез представлен мергелями серыми сильно выветрелыми, сильно трещиноватыми, малопрочными, с прослоями трещиноватого песчаника; характерные скорости поперечных волн составляют в слабонарушенной части 1.6–1.8 км/с, снижаясь в оползневых отложениях до 0.4–0.9 км/с.

Массив, а особенно его смещенная в ходе предыдущих оползаний часть, характеризуются интенсивной трещиноватостью и частичной перемятостью, что дает возможность использовать для расчетов программные комплексы, используемые для оценки устойчивости массивов, сложенных дисперсными и дисперсно-крупнообломочными грунтами [5]. Использовались созданные при непосредственном участии автора программы PSK-98M5A и PSK-2018, осуществляющие автоматизированный поиск реальной или потенциальной поверхности смещения любой формы с минимальным коэффициентом устойчивости в двухмерной постановке.

Была выполнена оценка возможных прочностных характеристик данных грунтов в массиве на основе зарубежных критериев прочности. Использовались широко распространенные в мире параметры методики Хоека–Брауна. При характеристиках для данных грунтов  $m_i = 10$  и индексах GSI для нарушенных оползанием грунтов 25 ед. и нарушенных 35 ед., по номограммам Хоека [17] определены значения:  $\phi = 24.5^\circ$  и  $27.5^\circ$  соответственно и  $C = 25/21$  (выше/ниже уровня подземных вод (УПВ)) КПа и  $32/28$  КПа соответственно.

Для проверки данных характеристик грунтов выполнены обратные расчеты для существующего и надежно фиксируемого визуально голоценового оползневого тела. Выполнена реконструк-

<sup>2</sup> СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003. <http://docs.cntd.ru/document/1200095540>

<sup>3</sup> Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям на оползневых склонах Северного Кавказа с целью их хозяйственного освоения. М.: Стройиздат. 1983. 68 с. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293795/4293795954.htm>

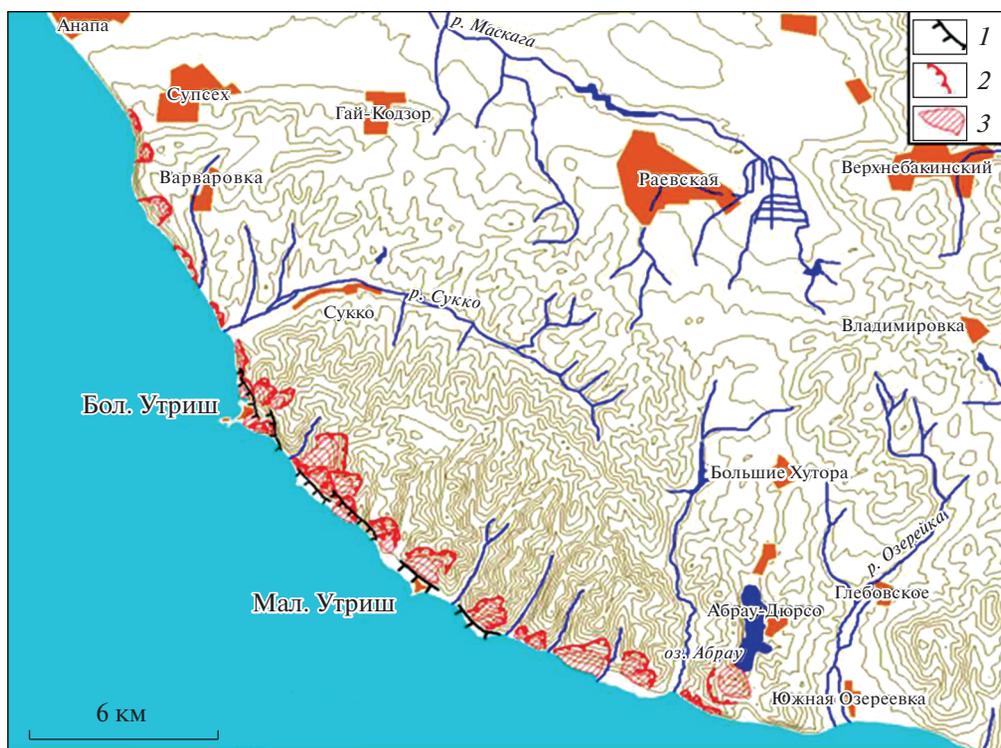


Рис. 1. Схема распространения на данной территории сейсмогенных оползней и их элементов: 1 – прямолинейные рвы и уступы; 2 – зоны отрыва оползней; 3 – оползневые тела [11].

ция рельефа склона на момент, предшествующий оползанию, и принята предпосылка о том, что разрушение склонового массива происходило под воздействием сильного землетрясения (9.5 баллов) в геолого-морфологических условиях данного участка. Это воздействие могло вызвать оползание при следующих средних прочностных характеристиках грунтов в массиве:  $\varphi = 28^{\circ}-29^{\circ}$ ,  $C$  – около 50 Кпа. При меньшем сейсмическом воздействии критические прочностные характеристики грунтов, естественно, оказываются ниже.

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

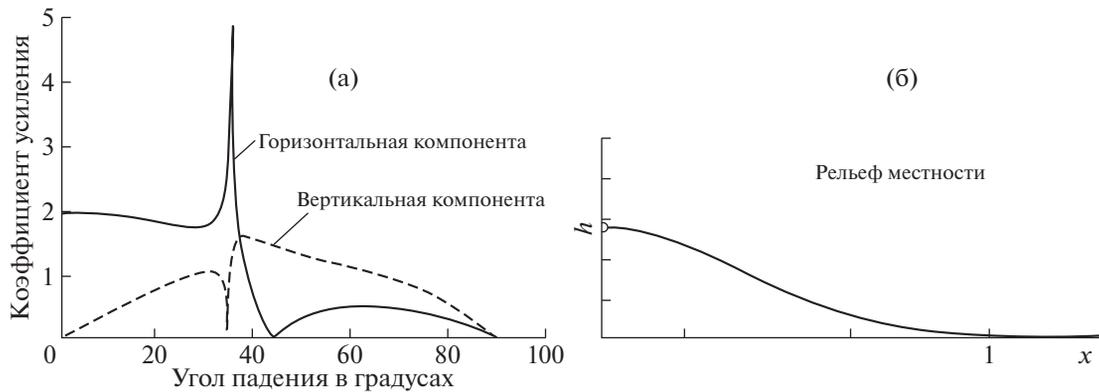
Многочисленные отечественные и зарубежные исследования показали значительное усиление сейсмического воздействия на участках, примыкающих к бровкам и уступам, вершинам возвышенностей и на выпуклых формах рельефа [1, 6].

Теоретические и численные модели предсказывают усиление колебаний на вершинах, т.е. на “выпуклых” участках, и снижение интенсивности колебаний на “вогнутых” участках, таких как долины и подножья холмов, причем величина эффекта зависит от характеристик падающих сейсмических волн: их типов, углов и азимутов падения (рис. 2, 3). На склонах холмов прогнози-

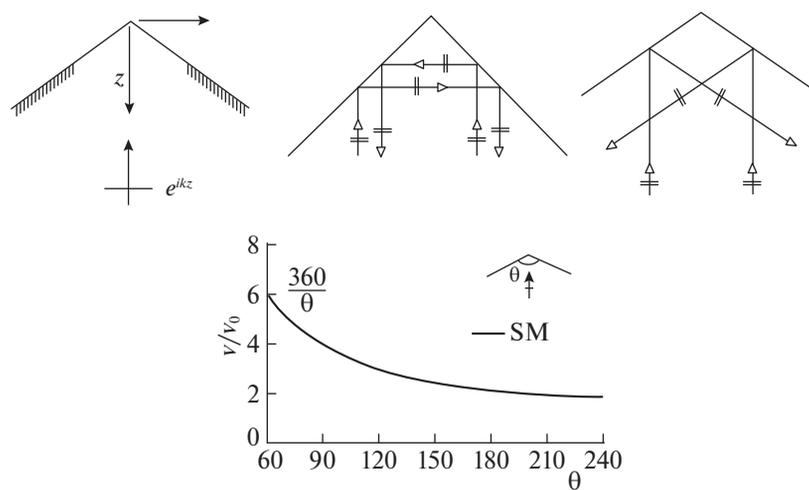
руется сложное распределение участков усиления и ослабления сейсмических сигналов.

Данные записей сильных землетрясений также свидетельствуют о том, что топография поверхности существенно влияет на амплитуду и частотный состав сейсмических колебаний. После землетрясений, вызывающих разрушения в горных областях, часто сообщалось, что постройки на вершинах холмов претерпевали гораздо большие разрушения, чем строения, расположенные в низинах. Примеры таких сообщений можно найти: для землетрясения 1909 г. в Ламбеске, Франция; для землетрясения 1976 г. во Фриули, Италия; для землетрясения 1980 г. в Ирпинии; для Чилийского землетрясения 1985 г. и других. Недавнее землетрясение 1995 г. в Козани (северная Греция) дало новые свидетельства сильных разрушений в населенных пунктах, расположенных на вершинах холмов. Наблюдения необычных поверхностных разломов (поваленных деревьев) и сдвинутых с мест больших валунов, свидетельствовавших о вертикальных ускорениях  $>1g$ , могут быть объяснены эффектами топографии и критическими углами выхода SV-волн [9].

Топографические эффекты землетрясений обусловлены 3 основными физическими механизмами:



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента усиления колебаний от угла падения волн (а) для наклонно падающих волн SV для показанного рельефа местности (б). Коэффициент Пуассона принят равным 0.25 [14].



**Рис. 3.** Распространение идущих вертикально снизу SH-волн в среде, ограниченной двумя пересекающимися плоскими поверхностями в форме клина [14]. Если угол клина равен  $2\pi/n$ , образуются  $n$  различных волн, распространяющихся в каждой точке среды: падающая волна, отраженная волна и многократно ( $n \geq 4$ ) отраженные волны. Все волны конструктивно интерферируют на вершине, и результирующая амплитуда колебаний в  $n$  раз больше амплитуды падающей волны. Показаны волны, соответствующие  $n = 3$  и  $n = 4$ , на нижнем рисунке показано результирующее движение на вершине в функции угла клина [9].

– зависимостью интенсивности колебаний на поверхности (и в приповерхностных слоях – М.К.) от угла падения волны (особенно заметной для вертикально поляризованных поперечных волн при близких к критическим углам падения), выражающееся в значительных вариациях интенсивности колебаний при изменении наклонов поверхности (см. рис. 2). Указывается, что этот эффект, возможно, объясняет сложную картину разрушений при землетрясении 1987 г. в Калифорнии;

– фокусировкой и дефокусировкой сейсмических волн, отраженных от поверхности со сложной топографией. Теоретические исследования этого эффекта для среды, ограниченной двумя пересекающимися плоскостями (учитывая отсут-

ствие сдвига фаз между падающими и отраженными волнами), показали, что амплитуда колебаний на вершине при многократном отражении волн в несколько раз превышает амплитуду падающей волны (см. рис. 3);

– дифракцией объемных и поверхностных волн, отраженных от элементов рельефа, и их интерференцией с падающими волнами.

Наблюдаемые при сильных землетрясениях проявления “топографических эффектов” качественно согласуются с теорией в том, что касается усиления колебаний на вершинах холмов и ослабления в низинах. Усиление это больше проявляется на горизонтальных компонентах, чем на вертикальных, при этом из двух горизонтальных компонент в наибольшей степени усиливаются

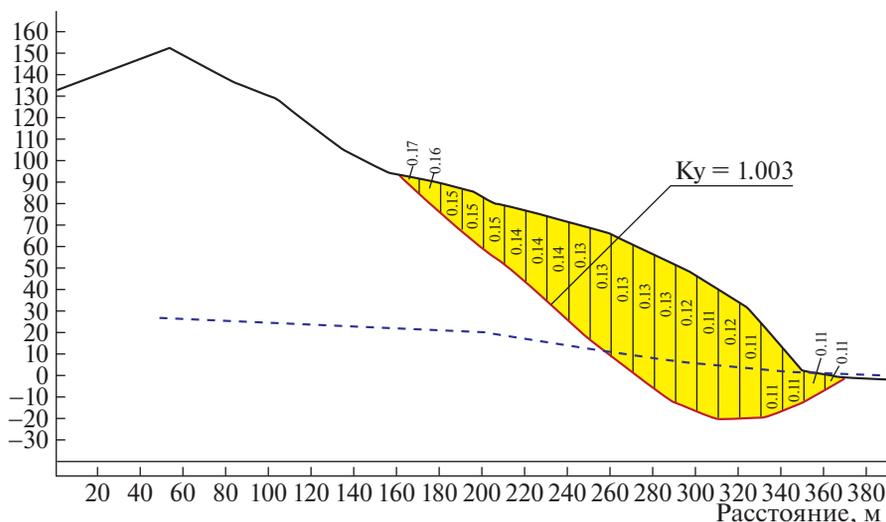


Рис. 4. Расчетные значения коэффициентов сейсмичности  $K_c$  по блокам геомеханической модели.

колебания в направлении, перпендикулярном оси гребня. Чем больше средняя крутизна склона, тем выше усиление на вершине. Усиление и ослабление колебаний в максимальной степени наблюдается при длинах волн, сравнимых с горизонтальными размерами крупных неровностей рельефа. Степень усиления параметров сейсмических колебаний весьма различна и имеет значительные вариации даже в пределах одного склона [16].

Одно из наиболее ярких проявлений влияния рельефа местности зафиксировано инструментально на крутом склоне в Южных Альпах, где интенсивность колебаний изменялась в 10 раз в полосе частот 5–10 Гц. Другой пример – при землетрясении 1994 г. в Нортридже (США) наблюдалось пятикратное усиление колебаний на частотах около 3 Гц, зарегистрированное станцией Тарзана [9].

Расчитанные для района г. Новороссийска приращения сейсмической интенсивности достигают 1–1.2 балла в районе вершин возвышенностей даже с меньшей относительной высотой и крутизной склонов, чем на рассматриваемом участке; к подножью склонов приращения бальности уменьшаются<sup>4</sup>. Исходя из данных, полученных в ходе исследования на физической модели влияния сейсмичности (г. Сухуми) [1], можно определить, что при коэффициентах рельефности рассматриваемого склона сейсмические ускорения увеличиваются примерно в 2.5 раза по сравнению с ускорениями на горизонтальных площадках. Согласно методике В.Б. Заалишвили,

<sup>4</sup> Количественная оценка влияния рельефа на сейсмичность территории г. Новороссийска. Заключительный отчет. Госстрой РСФСР. НПО Стройизыскания. ПНИИИС. Москва, 1990.

влияние геоморфологических условий на приращение бальности выражается формулой [9]:

$$\Delta J_3 = -0.71 + 0.53 \lg(\alpha H) + K, \quad (1)$$

где  $\Delta J_3$  – приращение сейсмической интенсивности в зависимости от геоморфологических условий, балл;  $\alpha H$  – коэффициент рельефности:  $\alpha$  – угол наклона рельефа, град,  $H$  – относительная высота, м;  $K$  – коэффициент, который определяет поправку на тип грунта.

Для выбранного типового участка в привершинной зоне приращение интенсивности  $\Delta J_3 = -0.71 + 0.53 \lg(27 \cdot 155) = 1.22$  балла.

Исходная сейсмичность данного участка для повторяемости один раз в 1000 лет согласно ОСР 2015 (В) 8.6–8.7 балла для “средних” грунтовых условий [12]. Грунты, нарушенные предыдущими стадиями оползания, хотя и являются преимущественно полускальными, по сейсмической жесткости следует отнести тоже к “средним”. Таким образом, расчетное сейсмическое воздействие для привершинной части данного склона следует принять равным 9.7–10.0 балла, для нижней половины склона – около 9 баллов.

Так как вышеописанные эффекты влияния рельефа по-разному воздействуют на разные части потенциального оползневоего тела, сделана попытка это учесть в расчетах устойчивости. Для уточнения распределения в массиве расчетных пиковых сейсмических ускорений PGA был использован расчет в среде Matlab, реализующей алгоритм NERA. Полученные значения расчетных ускорений в изолиниях были обработаны с расчетом средневзвешенного значения PGA в пределах каждого расчетного блока (шаг блоков по горизонтали 10 м) геомеханической модели (рис. 4).

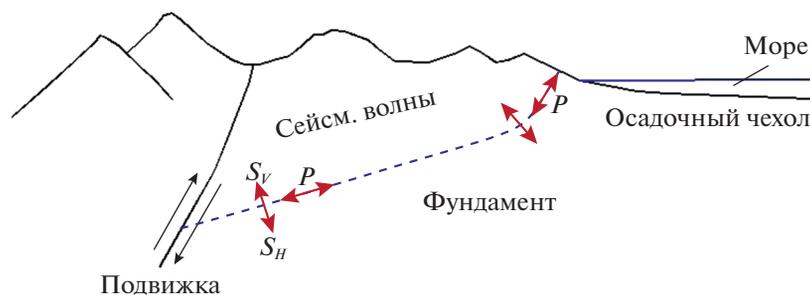


Рис. 5. Распространение сейсмических волн из очага землетрясения вверх к поверхности. Волны:  $P$  – продольные,  $S_V$  – поперечные вертикально поляризованные,  $S_H$  – поперечные горизонтально поляризованные.

Далее уточнение коэффициента устойчивости выполнялось на основе сопоставления результатов, полученных при едином коэффициенте сейсмичности для склонового массива в целом и при раздельном учете коэффициента сейсмичности по блокам с использованием принципа “прислоненного откоса” по следующим формулам:

$$G_i = P_i \cdot \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_i, \quad (2)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n G + \sum_{i=1}^n F_H^{div}}{\sum_{i=1}^n G + \sum_{i=1}^n F_H^{gen}} = K_1, \quad (3)$$

$$K_{st} = \frac{K_{st}^{gen}}{K_1}, \quad (4)$$

где  $P_i$  – вес блока,  $\alpha_i$  – угол наклона поверхности смещения блока,  $G$  – горизонтальная составляющая сдвигающей силы в блоке,  $F_H^{div}$  – горизонтальная сейсмическая сила для блока при раздельном учете коэффициента сейсмичности по блокам,  $F_H^{gen}$  – горизонтальная сейсмическая сила для блока при едином коэффициенте сейсмичности для склонового массива в целом,  $K_{st}^{gen}$  – коэффициент устойчивости при едином коэффициенте сейсмичности для склонового массива в целом.

Рассчитанное соотношение  $K_1 = 1.077$ .

При минимальном коэффициенте устойчивости 1.08, полученном с использованием единого  $K_c$ , истинный коэффициент устойчивости составит:  $K_{st} = 1.080 : 1.077 = 1.003$ .

Таким образом, вычисление полей сейсмических ускорений с помощью специализированных программ в сочетании с расчетами устойчивости при дифференцированном учете сейсмических ускорений позволяет уточнить степень устойчивости массивов и параметры (объем, размеры в плане, глубина захвата) потенциальных оползневых явлений.

Большой интерес представляет совместное рассмотрение параметров сейсмического воздействия (ускорение, частота, продолжительность) и их направление в трехмерном пространстве.

Волны, генерируемые в эпицентре землетрясения, излучаются во всех направлениях. При распространении через слой грунта они рассеиваются, отражаются и преломляются в соответствии с законом преломления Снеллиуса:

$$\frac{\sin \Theta_1}{V_1} = \frac{\sin \Theta_2}{V_2}, \quad (5)$$

откуда

$$\sin \Theta_2 = \frac{V_2}{V_1} \sin \Theta_1. \quad (6)$$

Поскольку сейсмические свойства приповерхностных слоев, как правило, ниже, чем в глубоких частях массива, крутизна траектории сейсмических волн у поверхности земли вследствие преломления увеличивается (рис. 5).

При расположении очага землетрясения со стороны основания склона для выбранного типового участка (рис. 6) сейсмическое воздействие продольных волн, даже в фазе “вниз”, имеет значительную “прижимающую” составляющую, нормальную к потенциальной зоне смещения (рис. 7). Поперечные же волны при длине волны 300–400 м будут оказывать на напряженное состояние разнонаправленное по длине оползня влияние. Для части массива их воздействие будет иметь определенную вертикально вверх направленную составляющую, плюс горизонтальную составляющую, направленную вниз по склону, в то время как в другой части массива сейсмические силы направлены вглубь склона, повышая устойчивость. Таким образом, наиболее вероятно возникновение сейсмогенного оползня, охватывающего лишь часть склона – в данном случае, скорее всего нижнюю, подработанную морской абразией.

Опаснее оказывается приход сейсмической волны с противоположной стороны, “из-за спины” склона, когда волна будет приходиться к по-

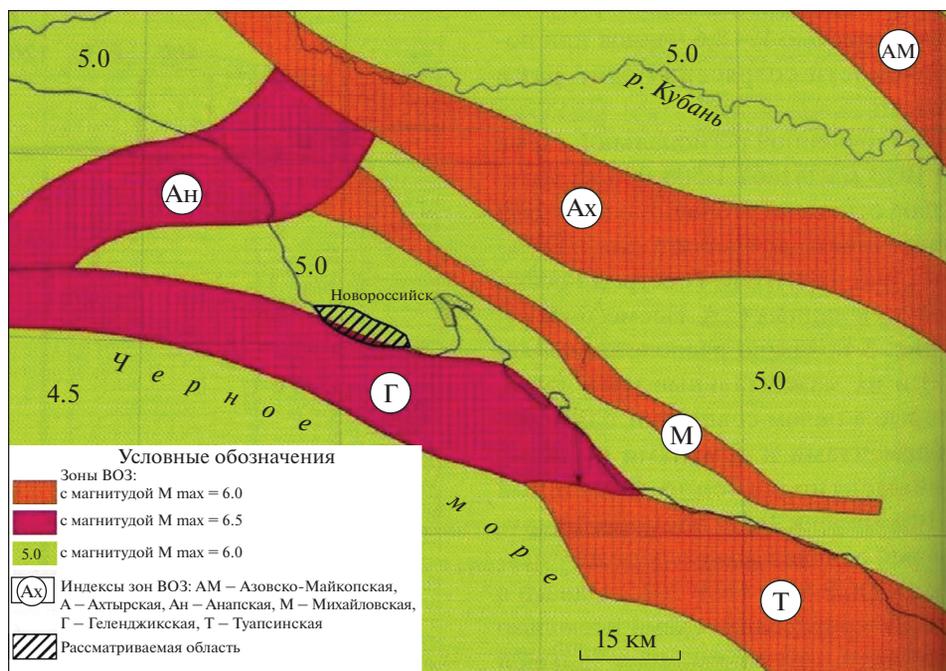


Рис. 6. Схема зон возможных очагов землетрясений (зон ВОЗ) [8].

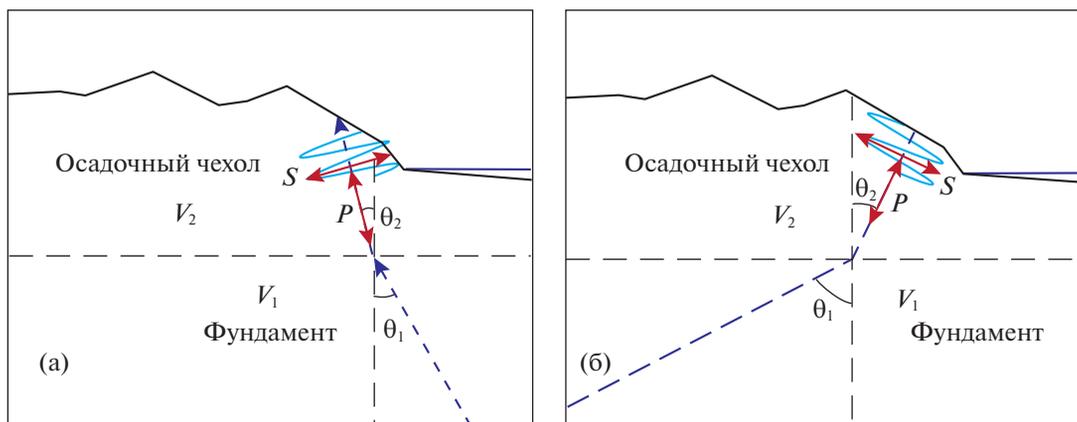


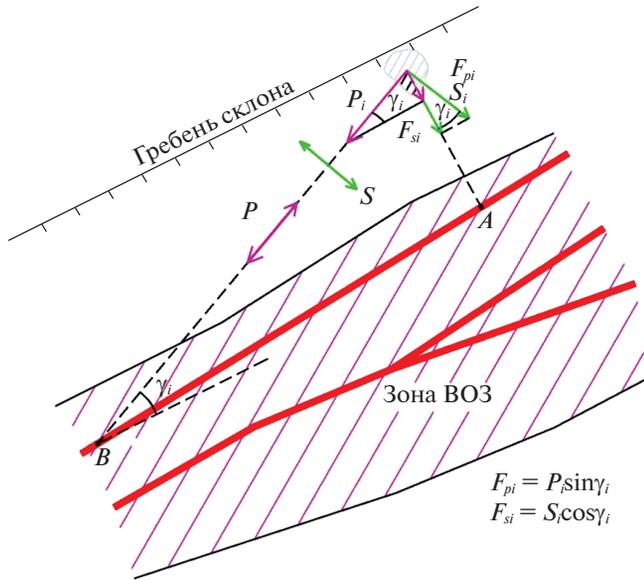
Рис. 7. Подход сейсмической волны к рассматриваемому участку из: (а) – Геленджикской зоны ВОЗ (максимальная магнитуда – 6.5 при средней глубине очага 15 км [12] и эпицентральной дистанции 8–9 км,  $V_1/V_2 = 2$ ,  $\theta_1 = 30^\circ$ , откуда  $\theta_2 = 14.5^\circ$ ); (б) – Михайловской зоны ВОЗ (максимальная магнитуда – 6 при средней глубине очага 10 км [12] и эпицентральной дистанции около 20 км,  $V_1/V_2 = 2$ ,  $\theta_1 = 63^\circ$ , откуда  $\theta_2 = 26.5^\circ$ ).

верхности склона почти по нормали. В данном регионе это соответствует возникновению землетрясения в Михайловской зоне ВОЗ (см. рис. 6), расположенной дальше от рассматриваемой прибрежной области и характеризующейся несколько меньшими возможными магнитудами.

При расположении сейсмического очага не напротив оползнеопасного склона углы подхода волн будут, естественно, значительно больше, однако преломление волн приводит к тому, что углы их подхода вблизи поверхности земли  $\theta_2$  увеличатся лишь на  $3^\circ$ – $10^\circ$ .

При большей разнице в скоростях волн в породах фундамента и приповерхностных слоях, которая может достигать 10–20 и более раз, фронт волны к поверхности земли подходит почти по вертикали ( $\pm 5^\circ$ ).

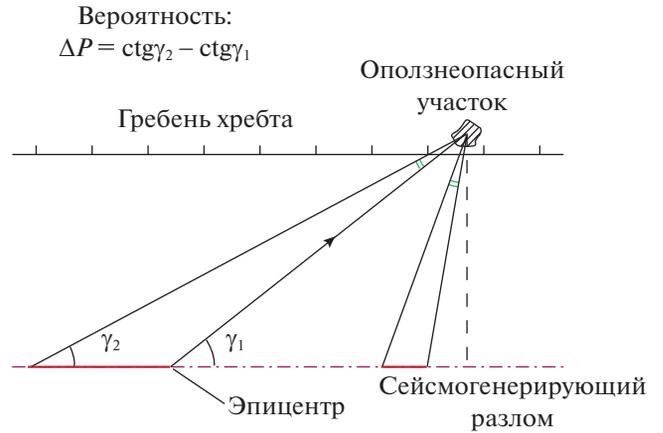
Воздействие поперечных сейсмических волн, естественно, также уменьшается с увеличением расстояния от оползневого участка до сейсмического очага, но в остальном оно меняется при этом по-другому. На силовом воздействии вертикально поляризованных волн изменение азимута вообще не сказывается, воздействие же горизонтально поляризованных поперечных волн по ме-



**Рис. 8.** Схема расчета основных горизонтальных составляющих “оползнеопасных” сейсмических воздействий. Жирными линиями обозначены сейсмогенерирующие разломы.

ре удаления сейсмического очага от оползнеопасного склона становится даже более неблагоприятным для устойчивости склонов (рис. 8).

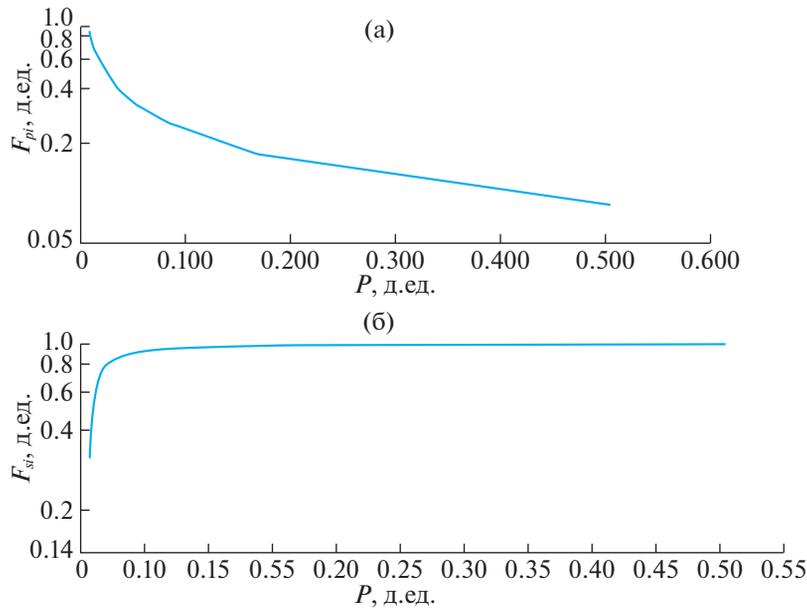
При рассмотрении вероятности воздействия Р- и S-волн на оползнеопасный участок было предположено равновероятное расположение сейсмического очага в пределах всего рассматриваемого сейсмогенерирующего разлома по длине, кроме его участков, находящихся на большом



**Рис. 9.** Схема оценки вероятности воздействия в зависимости от угла между разломом и гребнем в плане.

расстоянии от оползнеопасного склона и имеющих, соответственно, угол  $\gamma$  меньше  $5^\circ$  (рис. 9). Для столь удаленных очагов сейсмическое воздействие будет ослаблено вследствие поглощения и рассеивания сейсмической энергии.

Весь диапазон возможных углов прихода волны к оползнеопасному участку  $\gamma$ , подразделялся на участки по пять градусов (начиная с  $5^\circ$ ) с последующим вычислением для каждого участка вероятности сейсмического воздействия и его относительной интенсивности. Величина интенсивности воздействия для продольных волн, пропорциональна синусу угла между направлением движения фронта волны и простираем гребня склона, увеличивается с уменьшением вероятности такого воздействия (рис. 10a). Подобная оценка



**Рис. 10.** Взаимосвязь вероятности  $P = (\text{ctg} \gamma - \text{ctg}(\gamma + 5)) / \Sigma$ , д. ед. относительного сейсмического воздействия  $F_{pi}$  планового направления продольной (а) и поперечной (б) сейсмической волны.

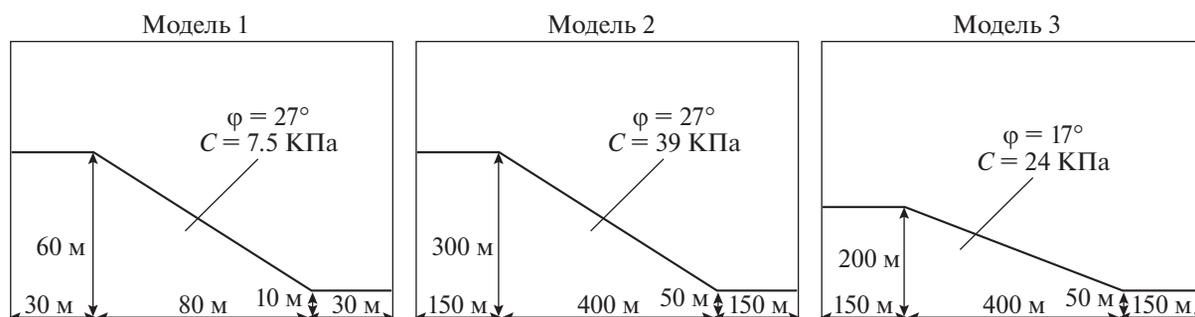


Рис. 11. Параметры использованных моделей.

произведена и для поперечных волн (S-волн) (рис. 10б).

Как видно, вероятность значительных сейсмических воздействий продольных волн на устойчивость склонов невелика, в то время как подобная вероятность для воздействия поперечных волн, напротив, значительна. В случае непараллельности гребня возвышенности и сейсмогенерирующего разлома формулы для сил воздействия продольных и поперечных волн приобретут, соответственно, следующий вид:

$$F_{pi} = F_p \cdot \sin(\gamma_i + \alpha), \quad (7)$$

$$F_{si} = F_s \cdot \cos(\gamma_i + \alpha), \quad (8)$$

где  $\alpha$  – угол между осями гребня и сейсмогенерирующего разлома.

Разумеется, подобные закономерности справедливы лишь для случаев, когда контура изосейст представляют собой овалы с небольшим различием между длиной большой и малой осей. В случаях, когда затухание сейсмических колебаний вдоль разлома намного меньше, чем в направлении, перпендикулярном к нему (например, при Вэньчуаньском землетрясении 2008 г.), сейсмическое воздействие осуществляется в основном по кратчайшему расстоянию до разлома, т.е. перпендикулярно к нему, в этом случае влияние продольных волн может быть значительным.

Вертикально направленные составляющие сейсмических сил вызывают периодические, в соответствии с частотой сейсмических колебаний, изменения вертикальной составляющей напряженного состояния в массиве (псевдовзвешивание и псевдопригружение). Для моделирования этого явления в первом приближении можно вводить в расчеты устойчивости переменные значения плотности грунтов, моделируя таким образом вышеуказанные изменения вертикальных напряжений.

Для выявления влияния плотности грунтов массива на коэффициент устойчивости с помощью данной программы были выполнены расчеты устойчивости для трех модельных однородных склонов (модель 2 геометрически подобна моде-

ли 1 с увеличением в 5 раз, модель 3 характеризует более пологий склон). Прочностные характеристики грунтов для каждой модели постоянны и подбирались исходя из близости массивов к предельному состоянию при плотности грунтов  $2 \text{ т/м}^3$  (рис. 11).

Полученные результаты иллюстрируют закономерное, но нелинейное снижение устойчивости с ростом плотности грунтов. Изменение коэффициента устойчивости практически не зависит от размеров массива, возможные изменения вертикальных напряжений вызывают изменения коэффициента устойчивости на величину до 7–9% (табл. 1).

Чтобы оценить возможность дальнейшего смещения, в случае, если в ходе выполнения расчетов при заданном сейсмическом воздействии получен коэффициент устойчивости  $K_u < 1$ , необходимо выполнить расчет устойчивости без сейсмического воздействия при параметрах остаточной прочности грунтов, либо при параметрах прочности “параллельно напластованию”, либо прочности по трещинам (в зависимости от вида грунта).

Смещения массива во время сейсмических колебаний невелики вследствие малой продолжительности землетрясений и большой инерцион-

Таблица 1. Значения коэффициента устойчивости в зависимости от плотности грунтов

Плотность	Модель 1	Модель 2	Модель 3
$\rho, \text{ т/м}^3$	К <sub>у</sub>		
1.2	1.077		1.090
1.6	1.027		
2.0	1.000	1.002	1.002
2.4	0.978	0.982	0.977
2.8	0.963	0.966	0.961
3.2	0.952	0.956	0.950
3.6	0.942	0.945	0.940
4.0		0.938	0.931

ности массива. Поэтому в большинстве случаев для этого расчета, можно использовать геомеханическую модель той же формы и внутренней структуры.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, потенциально возможно существенное повышение точности количественных расчетов устойчивости, объемов оползневых тел и оползневых давлений на основе следующего подхода:

- предварительное уточнение сейсмических ускорений на разных участках оползнеопасного склона с использованием специализированных компьютерных программ, разработанных для инженерной сейсмологии и опирающихся на различие в сейсмических, физических и деформационных характеристиках грунтов в пределах массива;

- уточнение сейсмических ускорений и коэффициентов сейсмичности для разных участков склона на основе его высоты, крутизны, формы;

- уточнение направлений и силы сейсмических воздействий на основе представлений о возможных углах подхода сейсмических волн и направлениях колебаний;

- использование при псевдостатических расчетах устойчивости различных коэффициентов сейсмичности для разных участков склона;

- выполнение расчета без сейсмического воздействия при параметрах остаточной прочности грунтов в случае получения расчетного значения коэффициента устойчивости  $K_u \leq 1$  при заданном сейсмическом воздействии, что является завершением оценки устойчивости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Заалишвили В.Б.* Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок / Отв. ред. Николаев А.В. М.: Наука, 2009. 350 с.
2. *Калинин Э.В.* Инженерно-геологические расчеты и моделирование. М.: Изд-во МГУ, 2006. 256 с.
3. *Кан К., Зеркаль О.В., Лю Ц.* Сравнительный анализ учета сейсмического воздействия при количественной оценке устойчивости склонов в России, Китае и Европе // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: XIII Общерос. научно-практ. конф. и выставка (29.11–01.12.2017 г. Москва). М.: Геомаркетинг, 2017. С. 533–540.
4. *Кан К., Зеркаль О.В., Фоменко И.К., Пономарев Ан.Ал.* Современные подходы к количественной оценке устойчивости склонов при сейсмическом воздействии // Инженерная геология. 2018. № 1–2. С. 72–85.
5. *Кропоткин М.П.* Расчеты устойчивости склонов и откосов с использованием алгоритмов минимизации коэффициента устойчивости // Инженерные изыскания. 2017. № 1. С. 20–30.
6. *Назимова А.Д., Гаврилов А.В., Калинин Э.В., Бершов А.В.* Оценка влияния компонентов инженерно-геологических условий южного склона хребта Псехако (Краснодарский край) при сейсмомикрорайонировании с учетом техногенных преобразований // Инженерная геология. 2016. № 5. С. 32–38.
7. *Несмеянов С.А.* Шовные зоны как верхнекоровые сейсмогенерирующие // Геоэкология. 2012. № 1. С. 5–28.
8. *Островский А.Б.* Палеосеймотектонические дислокации на Черноморском побережье Северо-Западного Кавказа в связи с оценкой современной сейсмической опасности этой территории // Комплексные исследования Черноморской впадины. М.: Наука, 1970. С. 46–58.
9. *Павленко О.В.* Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. М.: Научный мир, 2009. 260 с.
10. *Попков В.И., Крицкая О.Ю., Остапенко А.А.* Сейсмогравитационные деформации и оценка сейсмической опасности южного склона Северо-Западного Кавказа // Актуальные проблемы современной сейсмологии: сб. докл. в Междунар. конференции, посв. 50-летию Института сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, (12–14 октября 2016 г., Ташкент, Узбекистан). Ташкент: ИС АН РУз, 2016. С. 452–456.
11. *Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатилов А.В.* Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.
12. *Трифонов Б.А., Севостьянов В.В.* Особенности проведения сейсмического микрорайонирования на урбанизированной территории морского побережья г. Геленджика при высотном строительстве // Инженерные изыскания. 2018. Т. XII. № 5–6. С. 82–90.
13. *Хромовских В.С., Никонов А.А.* По следам сильных землетрясений. М.: Наука, 1984. 144 с.
14. *Bard P.-Y.* Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues // Proc. of the 10th European conf. on earthquake engineering. Duma, Rotterdam. At: Vienna, Austria, 1995. P. 305–324.
15. Comite Europeen de Normalisation (CEN). Eurocode 8, design of structures for earthquakes resistance. Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects. European standard NF EN 1998-5. Brussels. Belgium, 2014.
16. *Geli L., Bard P.-Y., Jullien B.* The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results // Bull. Seism. Soc. Am. 1988. P. 42–63.
17. *Hoek E.* Putting Numbers to Geology: An Engineer's Viewpoint // Felsbau Rock and Soil Engineering. 1999. № 3. P. 139–151.

## SOME ASPECTS OF THE INFLUENCE OF SEISMIC IMPACTS ON THE SLOPE STABILITY (BY THE EXAMPLE OF THE DEVELOPED COASTAL ZONE IN THE WEST CAUCASUS)

**M. P. Kropotkin<sup>#</sup>**

*National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337 Russia*  
<sup>#</sup>*e-mail: singeos@narod.ru*

Some aspects of seismic impact on the stability of massive seismic gravitational solid massives are examined. The case of the slope stability calculation using separate accounting for seismic accelerations in blocks is shown. The influence of the relief on the change in seismic effects is considered. The comparative impact of longitudinal and transverse seismic waves from the earthquake focuses located in front of the slope foot and behind the slope ridge is evaluated. Some interrelations between the impact parameters caused by the seismic waves from the possible earthquake source and the slope stability are analyzed in dependence of the spatial position of seismic sources and landslide-prone sites. It is concluded that the hazard of major seismic impacts of longitudinal waves on slope stability is small, whereas the probability of transverse waves impact is, on the contrary, high.

**Keywords:** *the Black Sea, coast, earthquakes, rock landslides, slope stability calculations*

### REFERENCES

1. Zaalishvili, V.B. *Seismicheskoe mikroraiionirovanie territorii gorodov, naseleennykh punktov i bol'shikh stroitel'nykh ploshchadok* [Seismic microzoning of urban and construction site territories]. Nikolaev, A.V., Editor. Moscow, Nauka Publ., 2009, 350 p. (in Russian)
2. Kalinin, E.V. *Inzhenerno-geologicheskie raschety i modelirovanie* [Engineering geological calculations and modeling]. Moscow, MSU Publ., 2006, 256 p. (in Russian)
3. Kan, K., Zerkal', O.V., Lyu, Ts. A comparative analysis of the accounting for seismic effects in the quantitative assessment of slope stability in Russia, China and Europe. *Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiiskoi Federatsii: XIII Obshcheross. nauchno-prakt. Konferentsiya iI vystavka (29.11–01.12.2017, g. Moskva)* [Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation: XIII All-Russian Scientific and Practical Conference and Exhibition (29.11–01.12.2017, Moscow)]. Moscow, Geomarketing Publ., 2017, pp. 533–540. (in Russian)
4. Kan, K., Zerkal', O.V., Fomenko, I.K., Ponomarev, A.A. *Sovremennye podkhody k kolichestvennoi otsenke ustoichivosti sklonov pri seismicheskom vozdeistvii* [Modern approaches to the quantitative assessment of slope stability under seismic conditions]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, no. 1–2, pp. 72–85. (in Russian)
5. Kropotkin, M.P. *Raschety ustoichivosti sklonov i otkosov s ispol'zovaniem algoritmov minimizatsii koefitsienta ustoichivosti* [Slope stability calculations based on algorithms of minimization of the stability coefficient]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2017, no. 1, pp. 20–30. (in Russian)
6. Nazimova, A.D., Gavrillov, A.V., Kalinin, E.V., Ber-shov, A.V. *Otsenka vliyaniya komponentov inzhenerno-geologicheskikh uslovii yuzhnogo sklona khrebt*
7. Nesmeyanov, S.A. *Shovnye zony kak verkhnekorovyie seismogeneriruyushchie struktury* [Suture zones as the upper crust seismogenerating structures]. *Geologiya*, 2012, no.1, pp. 5–28. (in Russian)
8. Ostrovskii, A.B. Paleoseismotectonic dislocation on Black Sea Coast of the North-Western Caucasus in relation to the modern estimation of the seismic hazard. *Kompleksnye issledovaniya Chernomorskoj vpadiny* [Complex investigation of the Black Sea basin]. Moscow, Nauka Publ., 1970, pp. 46–58. (in Russian)
9. Pavlenko, O.V. *Seismicheskie volny v gruntovykh sloyakh: nelineinoe povedenie grunta pri sil'nykh zemletryaseniyakh poslednikh let* [Seismic waves in ground layers: nonlinear behavior of soils upon recent strong earthquakes]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2009, 260 p. (in Russian)
10. Popkov, V.I., Kritskaya, O.Yu., Ostapenko, A.A. Seismogravitational deformations and estimation of seismic hazard of southern slope of the North-Western Caucasus. *Aktual'nye problemy sovremennoi seismologii: Sb.dokl. Mezhdunar.konferentsii, posv.50-letiyu Instituta seismologii im.G.A.Mavlyanova AN RUz* [Urgent problems in modern seismology: Proc. Intern. Conf. devoted to the 50th anniversary of G.A.Mavlyanov Institute of Seismology, Academy of Sciences of Uzbekistan, October 12–14, 2016, Tashkent, Uzbekistan]. Tashkent, 2016, pp. 452–456. (in Russian)
11. Rogozhin, E.A., Ovsyuchenko, A.N., Lutikov, A.I., Sobisevich, A.L., Sobisevich, L.E., Gorbatikov, A.B. *Endogennye opasnosti Bol'shogo Kavkaza* [Endoge-

- nous hazards of the Greater Caucasus]. Moscow, IFZ RAN, 2014, 256 p. (in Russian)
12. Trifonov, B.A., Sevost'yanov, V.V. *Osobennosti provedeniya seismicheskogo mikroraiirovaniya na urbanizirovannoi territorii morskogo poberezh'ya g. Gelendzhik pri vysotnom stroitel'stve* [Peculiarities of seismic microzoning at the urbanized territory of Gelendzhik sea coast upon high-rise construction]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2018, vol. XII, no. 5–6, pp. 82–90. (in Russian)
  13. Khromovskikh, V.S., Nikonov, A.A. *Po sledam sil'nykh zemletryasenii* [Tracing strong earthquakes]. Moscow, Nauka, 1984, 144 p. (in Russian)
  14. Bard, P.-Y. Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues. Proc. of the 10th European Conference on Earthquake Engineering. Duma, Rotterdam, Balkema Publ., 1995, pp. 305–324.
  15. Comite Europeen de Normalisation (CEN). Eurocode 8, design of structures for earthquakes resistance. Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects. European standard NF EN 1998-5. Brussels. Belgium, 2014.
  16. Geli, L., Bard, P.-Y., Jullien, B. The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1988, pp. 42–63.
  17. Hoek, E. *Putting Numbers to Geology: An Engineer's Viewpoint. Felsbau Rock and Soil Engineering*, 1999, no. 3, pp.139–151.