

ОБОСНОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ГЕНЕЗИСА КРУПНЫХ ОПОЛЗНЕЙ В СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ ДАГЕСТАНА И ГРАНДИОЗНОГО СКАЛЬНОГО ОПОЛЗНЯ СЕЙМАРЕ В ИРАНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ОЦЕНОК УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ

© ^{1,2}Стром А.Л., ³Фоменко И.К., ⁴Зеркаль О.В., ⁵Тарабукин В.В., ⁶Шоаеи З.

¹ООО "Центр Геодинамических исследований", г. Москва

²ООО "Институт геотехники и инженерных изысканий", г. Москва

³Российский Геолого-Разведочный Университет им. С. Орджоникидзе, г. Москва

⁴Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

⁵АО «Институт«Оргэнергострой», г. Москва

⁶Институт предотвращения эрозии почв
и управлению водохозяйственной деятельностью, г. Тегеран

Приведены результаты обратных расчетов устойчивости склонов горных хребтов, образованных крупными антиклинальными складками, на которых в доисторическое время происходили крупные скальные оползни. Склоны бронированы пачками известняков мощностью в десятки и сотни метров, подстилаемыми менее прочными породами, в которых и формировались поверхности скольжения. Поскольку поверхность склонов совпадала с кровлей бронирующих пачек известняков, дооползневой рельеф на этих участках может быть восстановлен с высокой степенью достоверности. В качестве примеров рассмотрены оползни объемом в десятки миллионов кубометров горной части Дагестана и грандиозный оползень Сеймаре в Иране объемом около 25 км³. Проведенные расчеты показали, что для образования как Дагестанских оползней, так и оползня Сеймаре было необходимо внешнее (сейсмическое) воздействие интенсивностью не менее 7,5-8 баллов по шкале MSK-64.

Ключевые слова: скальный оползень, сейсмичность, расчет устойчивости склонов.

Введение

Крупномасштабные оползни в скальных массивах (скальные оползни) – одно из наиболее распространенных и наиболее разрушительных последствий сильных землетрясений в горных районах. Это ярко проявилось при таких землетрясениях, как Хаитское в Таджикистане в 1949 г. [Губин, 1960], Рачинское в Грузии в 1991 г. [Рогожин и др, 1991; Белоусов, 2009], Венчуанское в Китае в 2008 г. [Yin et al., 2008]. Поэтому оценка устойчивости склонов при сейсмических воздействиях является важным направлением исследований при изучении оползневой опасности горных территорий.

С другой стороны, такие оползни сохраняются в рельефе и ландшафте в течение длительного времени – тысячи и десятки тысяч лет и являются одним из важных объектов палеосейсмологических исследований [Солоненко, 1973; Мак-Калпин, 2011]. Однако, в отличие от сеймотектонических дислокаций – поверхностных разрывов, интерпретация которых как следов крупных древних землетрясений разработана всесторонне и детально [Yeats et al, 1997; Мак-Калпин, 2011], установление связи крупных древних (доисторических) оползней с сильными землетрясениями прошлого представляет собой сложную и, во-многом, противоречивую задачу. Многие критерии, предложенные для обоснования сейсмического происхождения таких оползней [Солоненко, 1973; Федоренко, 1988; Croizer, 1992; Jibson, 1996] при внимательном критическом анализе оказываются неоднозначными, а, иногда, ошибочными [Strom, Abdrahmatov, 2018], и их использование может привести к неверной оценке сейсмической опасности, особенно в регионах, для которых имеется лишь короткая (несколько сотен лет) летопись природных явлений.

Очевидно, что одним из наиболее эффективных способов установить, был ли тот или иной оползень спровоцирован землетрясением, или он мог произойти и без сейсмического воздействия, является "обратный" расчет устойчивости склона, на котором произошло исследуемое смещение. Однако при этом возникает ряд проблем, от решения которых зависит надежность и достоверность получаемых результатов. Это, во-первых, корректная оценка свойств пород, вовлеченных в смещение и, во-вторых, необходимость достоверно восстановить первоначальный рельеф, так как от этого зависит корректность ретроспективной модели.

Решение первой задачи достаточно универсально – опробование и изучение физико-механических свойств отложений, слагающих обрушившийся склон. Вторая же задача зачастую не имеет корректного решения. Однако есть группа скальных оползней, для которых она может быть решена практически идеально и однозначно. Речь идет об оползнях, произошедших на склонах хребтов, образованных крупными антиклинальными складками, бронированными прочными карбонатными породами большой мощности, чередующимися с пачками менее прочных, обычно терригенных или карбонатно-терригенных отложений (рис. 1).



Рис. 1. Кахский оползень в Хунзахском районе Дагестана на северном склоне хребта, образованного антиклинальной складкой с бронирующим горизонтом нижебарремских известняков

В этом и аналогичных случаях, в смещение вовлечены одна или, реже, несколько пачек карбонатных пород, а смещение происходит, в основном, по поверхностям напластования и лишь в основании склона поверхность скольжения может срезать бронирующую пачку. Поскольку мощности отдельных пачек на крыльях антиклиналей практически постоянны, по крайней мере на расстояниях, сопоставимых с размерами оползней в плане, дооползневой рельеф восстанавливается чрезвычайно просто и с высокой точностью. Заметим, что и распределение неоднородностей (поверхностей напластования, систем трещин) в таких скальных массивах достаточно устойчиво.

Такие условия характерны, в частности, для горных районов Дагестана (т.н. "Известняковый Дагестан", в пределах которого еще в 50-х годах прошлого века были выявлены многочисленные древние оползни на склонах хребтов-антиклиналей, бронированных известняками нижебарремского возраста [Петрусевич, 1963]. От решения вопроса о генезисе этих оползней во многом зависит оценка сейсмической опасности этой части Дагестана, где уже построен ряд гидроэлектростанций и проектируются новые ГЭС. Эти оползни, объемом в десятки миллионов кубометров каждый, могут рассматриваться и как природные крупномасштабные модели грандиозного оползня Сеймаре в Иране объемом по разным оценкам от 20 до 44 км³ [Harrison, Falcon, 1938; Shoaee, 2014; Delchiaro et al., 2020], который считается сейсмогенным [Berberian, 1994], в первую очередь из-за его колоссальных размеров, хотя данные, обосновывающие такое решение, не приводятся.

В предлагаемой статье приведены сравнительный анализ результатов численного моделирования устойчивости ряда склонов в Известняковом Дагестане и северного склона хр. Кабиркух на котором произошел оползень Сеймаре, показавшие, что рассмотренные скальные оползни действительно могли образоваться только в результате сейсмического воздействия значительной интенсивности.

Скальные оползни Известнякового Дагестана

Исследуемые оползни – Кахский (42,55°с.ш., 46,79°в.д.) и Западно-Гергебильский (42,542°с.ш., 47,028°в.д.) произошли на крыльях антиклиналей, бронируемых известняками нижнего подъяруса барремского яруса мощностью 50-90 м. Нижележащие отложения средней части готеривского яруса и валанжинского яруса и также представлены карбонатными отложениями мощностью, соответственно, 10-40 м и 25-35 м, разделёнными терригенными пачками нижнего и верхнего готерива, мощностью, соответственно, 25-45 м и 35-60 м. Ниже залегают верхнеюрские карбонатные отложения мощностью более 100 м [Брод, 1958]. Карбонатные отложения представлены плотными кристаллическими, органогенными и оолитовыми известняками и разбиты «Х-образными» системами доскладчатых трещин, падающими положе и круче слоистости, а также несколькими системами трещин перпендикулярных к слоистости. Терригенные отложения представлены песчаниками и алевролитами. Отрыв оползневых блоков предположительно произошел по трещинам, секущим бронирующий слой. Основная поверхность скольжения была приурочена к поверхности напластования в терригенной пачке верхнего готерива. В нижней своей части она срезала пачку нижнебарремских известняков, скорее всего по трещинам одной из Х-образных систем, падающим положе слоистости.

Согласно действующей нормативной карте общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 рассматриваемая часть Дагестана относится к 8-бальной зоне при среднем периоде повторяемости таких сотрясений 500 и 1000 лет, и к 9-бальной зоне при среднем периоде повторяемости 5000 лет, что учитывалось при расчете устойчивости исследуемых оползневых склонов.

Оползни, произошедшие на правом борту долины р. Каракойсу к западу от Гергебиля и у села Ках в Хунзахском районе Дагестана, затронули известняки нижнего баррема (K_1b_1) а также терригенные отложения верхнего готерива (K_1h_3) (рис. 1, 2), к которым и приурочена основная плоскость скольжения.



Рис. 2. Оползень в известняках нижнебарремского возраста к западу от пос. Гергебиль

Угол падения пачки нижнебарремских известняков на участке Кахского оползня изменялся от 13-14° в верхней части до 31-32° в нижней части склона. На южном крыле Кули-Меэрской антиклинали западнее Гергебиля углы падения бронирующего слоя возрастают более плавно от 12-13° в верхней части до ~28° в основании склона. На обоих участках поверхность склона до оползания совпадала с кровлей известняков нижнего баррема. Согласно ранее предложенной типизации скальных оползней [Зеркаль, Фоменко, 2016], описанные геологические условия благоприятны,

для развития оползней типа I.1b у которых зона отрыва приурочена к существующим поверхностям раздела (трещиноватость), зона скольжения имеет сложную форму, наследующую слоистость, деформированную в ходе складкообразования.

На первом этапе была восстановлена геометрия каждого изучаемого склона до начала развития оползневого процесса и созданы геомеханические модели для проведения обратных расчетов устойчивости восстановленных склонов.

При задании прочностных свойств скальных грунтов в массиве, в зависимости от структурных особенностей были использованы различные критерии прочности. Прочностные характеристики известняков задавались на основе обобщенного критерия Хоека-Брауна, являющегося примером нелинейного критерия прочности на сдвиг, разработанного для скальных грунтов [Hoek, Brown, 1980, 1997; Hoek, 1983] и увязанного с индексом геологической прочности [Hoek et al., 2002]. Этот критерий позволяет учесть масштабный эффект при переходе от свойств в образце породы к свойствам в массиве.

По данным лабораторных испытаний средняя прочность на одноосное сжатие была принята 100 МПа. Индекс GSI (geological strength index) определен равным 50, исходя из структуры, которая характеризуется как очень блочная с хорошим состоянием поверхности. Коэффициент m_i для известняков принят равным 9.

Прочностные свойства терригенного комплекса верхнего готерива K_1h_3 , учитывая его явно выраженную анизотропию, задавались на основе линейной анизотропной модели прочности: по плоскости напластования (поверхностям ослабления) сцепление (C^1) принималось равным 20 кПа, а угол внутреннего трения (φ^1) равным 25° ; по плоскости перпендикулярной напластованию – $C^2=100$ кПа, $\varphi^2=35^\circ$. Сводные характеристики свойств грунтов, принятые при выполнении обратных расчетов устойчивости склонов, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Прочностные свойства скальных грунтов, вовлеченных в Дагестанские оползни

Тип грунта	Плотность (kN/m^3)	Модель прочн.	Сцепление ¹ (кПа)	Угол вн. тр. ¹ (град.)	Сцепление ² (кПа)	Угол вн. тр. ² (град.)	Прочность на одноосн. сжатие (МПа)	GSI	m_i	D
Извест-няки K_1b_2	26	Обобщенная Хоека-Брауна					100000	50	9	0
Песчани-ки и алевро-литы K_1h_3	24	Линейная анизотроп-ная	20	25	100	35				

Расчеты устойчивости моделей восстановленных склонов производилось по нескольким расчетным схемам:

- в естественных условиях без сейсмической нагрузки
- в естественных условиях с сейсмическим воздействием разной интенсивности (7, 8 и 9 баллов по шкале MSK-64).

Учет сейсмического воздействия выполнялся на основе псевдостатического анализа. Количественная оценка устойчивости проводилась методами предельного равновесия (удовлетворяющих как равновесию сил, так и моментов) Моргенштерн-Прайса [Morgenstern, Price, 1965], Спенсера [Spencer, 1967] и Сарма [Sarma, 1973].

Как показали расчеты, выполненные методом Моргенштерна-Прайса (на основе которого получен наиболее консервативный вариант), склон, на котором произошел Кахский оползень, без сейсмической нагрузки является устойчивым с $K_{уст}=1,73$ (табл. 2). Сходный результат также был получен и другими методами (Спенсера и Сарма).

Количественная оценка устойчивости склона на рассматриваемом участке при сейсмическом воздействии равном 0,1g и 0,2g (7 и 8 баллов по шкале MSK-64, соответственно), полученная всеми тремя методами, показала, что склон и в этих условиях сохраняет свою устойчивость.

При горизонтальном сейсмическом ускорении равном 0,4g (9 баллов по шкале MSK-64) склон становится неустойчивымс $K_{уст}<1,00$ (табл. 2, рис. 3). На графике зависимости коэффициента устойчивости от горизонтального пикового ускорения, полученного с использованием метода Моргенштерна-Прайса (рис. 3б), можно увидеть, что склон переходит из состояния предельного равновесия в неустойчивое состояние при горизонтальном пиковом ускорении равном 0,3g, что примерно соответствует 8,5 баллам по шкале MSK-64. Близкие значения получены и при расчетах методами Спенсера и Сарма.

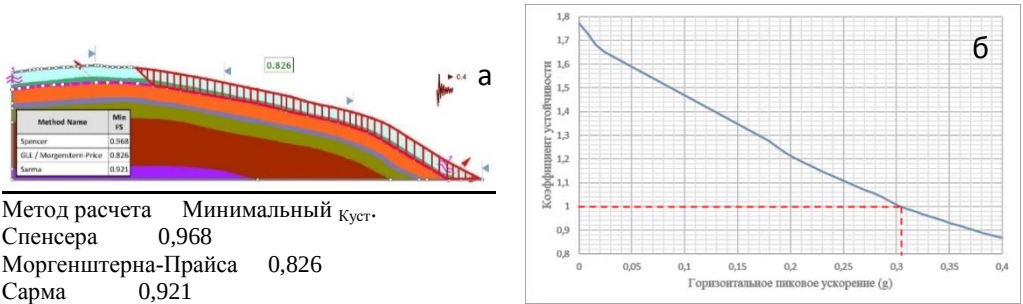


Рис. 3. Геомеханическая модель Кахского оползня с результатом расчета устойчивости склона с горизонтальным пиковым ускорением 0,4g (9 баллов по MSK-64) (а) и зависимость коэффициента устойчивости от горизонтального пикового ускорения (б)

Таблица 2
Результаты ретроспективной количественной оценки устойчивости на участке развития Кахского оползня

Вариант расчета	Метод	Моргенштерн – Прайс (М-П)	Спенсер	Сарма
Расчет устойчивости склона в естественных условиях		1,730	1,732	1,746
Расчет устойчивости склона в естественных условиях с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 7 баллов		1,385	1,350	1,436
Расчет устойчивости склона в естественных условиях с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 8 баллов		1,214	1,117	1,258
Расчет устойчивости склона в естественных условиях с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 9 баллов		0,826	0,968	0,921

Склон на южном крыле Кули-Меэрской антиклинали западнее Гергебиля, где произошел оползень, показанный на рисунке 2, в естественных условиях (без сейсмической нагрузки) является устойчивым с $K_{уст}=1,358$ (табл. 3). Сходный результат также был получен и другими методами (Спенсера и Сарма). Количественная оценка устойчивости склона на рассматриваемом участке при сейсмическом воздействии равном 0,1g (7 баллов по шкале MSK-64), показала, что склон в этих условиях сохраняет свою устойчивость (получено всеми методами).

Вместе с тем, в отличие от Кахского участка, на этом участке потеря устойчивости склона происходит, как показала ретроспективная количественная оценка (табл. 3), при горизонтальном сейсмическом ускорении уже равном 0,2g (что соответствует 8 баллам по шкале MSK-64). На графике зависимости коэффициента

устойчивости от горизонтального пикового ускорения, полученного с использованием метода Моргенштерна-Прайса (рис. 4б), можно увидеть, что склон переходит из состояния предельного равновесия в неустойчивое состояние при горизонтальном пиковом ускорении равном 0,16g, что близко к 7,5 баллам по шкале MSK-64. Близкие значения также были получены и при расчетах методами Спенсера и Сарма.

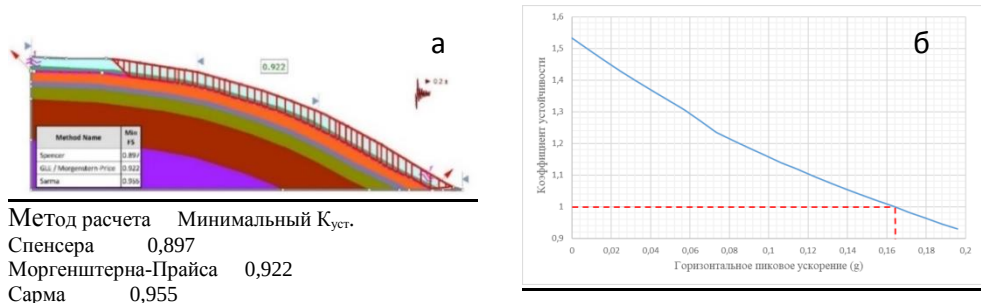


Рис. 4. Геомеханическая модель Западно-Гергебильского оползня с результатом расчета устойчивости склона с горизонтальным пиковым ускорением 0,2g (8 баллов по MSK-64) (а) и зависимость $K_{уст.}$ от горизонтального пикового ускорения (б)

Таблица 3

Результаты ретроспективной количественной оценки устойчивости на участке развития Западно-Гергебильского оползня

Вариант расчета	Метод	Моргенштерн – Прайс (М-П)	Спенсер	Сарма
Расчет устойчивости склона в естественных условиях		1,358	1,366	1,366
Расчет устойчивости склона в естественных условиях с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 7 баллов		1,110	1,074	1,124
Расчет устойчивости склона в естественных условиях с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 8 баллов		0,922	0,897	0,955
Расчет устойчивости склона в естественных условиях с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 9 баллов		0,680	0,658	0,657

Результаты ретроспективной количественной оценки устойчивости склонов на участке развития Кахского и Западно-Гергебильского оползней, полученные всеми использованными методами, при заданных геологических условиях и расчетных характеристиках, показали, что склоны на рассматриваемых участках в естественных условиях (без сейсмического воздействия) характеризовались устойчивым состоянием. Потеря устойчивости для рассматриваемых участков возможна лишь при дополнительном сейсмическом воздействии, составляющем по результатам выполненных оценок для Кахского оползня не менее 8,5 баллов по шкале MSK-64, а для Западно-Гергебильского оползня не менее 7,5 баллов по шкале MSK-64. Таким образом, рассмотренные оползни являются сейсмогенными, что должно учитываться при анализе как сейсмической, так и оползневой опасности этого района.

Оползень Сеймаре (Иран)

Смещение пачки известняков и мергелей формации Асмари олигоцен-миоценового возраста имевшую постоянную мощность и бронирующую склон, представляющий собой крыло крупной складки, произошло и при формировании гигантского оползня Сеймаре на северном склоне хр. Кабиркух в Загросе, Иран (33,01°с.ш., 47,6°в.д., рис. 5). Отложения формации Асмари подстилаются мергелисто-

сланцевой толщей формации Пабдех палеоцен-нижнеолигоценового возраста [Koleini, 2012]. Протяженность части склона вовлеченной в смещение достигала 15 км, ширина смещенного массива по падению - 5.0-5,5 км. Мощность сползшей пачки достигала 300-350 м. В центральной части отложения формации Пабдех были либо частично размыты, либо вовлечены в опознеобразование, вследствие чего глубина оползневого цирка на этом участке несколько больше, чем в краевых частях (см. рис. 5). При таких размерах сместившейся части склона ее объем составлял 24-25 км³. В отличие от вышеописанных Дагестанских оползней, поверхности скольжения которых несколько изгибались, становясь более крутыми в нижних частях склонов, оползень Сеймаре смещался, практически, по моноклинальной поверхности, наклоненной под углом 13-14° и только в основании склона формация Асмари была срезана, предположительно также по системе секущих трещин.

Такие геологические условия благоприятны для развития оползней типа I.1a [Зеркаль, Фоменко, 2016], имеющих зону отрыва и зону скольжения прямолинейной формы, приуроченную к существующим поверхностям раздела (трещиноватости и/или напластованию).

Для проведения расчетов был выбран профиль в восточной части оползня (1-1' на рис. 5), так как он, по нашему мнению, позволяет наиболее объективно отобразить исходное состояние склона. Дооползневой рельеф и положение основной поверхности скольжения были восстановлены, как показано на рисунке 6.

Для известняков формации Асмари, глинисто-карбонатных отложений формации Пабдех и зоны их контакта, по которой, по-видимому, и сформировалась поверхность скольжения этого оползня, с учетом данных приведенных в работе [Koleini, 2012; Ayub et al, 2014] были приняты показатели прочностных свойств, приведенные в таблице 4.

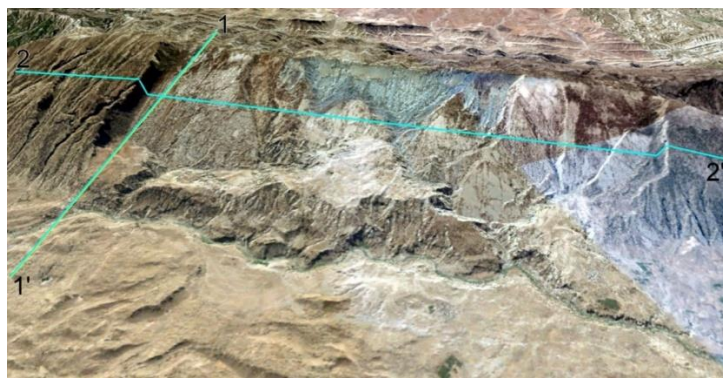


Рис. 5. Перспективное изображение цирка оползня Сеймаре на северном склоне хр. Кабиркух (изображение GoogleEarth, вид на юго-запад)

Нанесено положение расчетного профиля (1-1') и продольного профиля 2-2', показанного на рис. 6

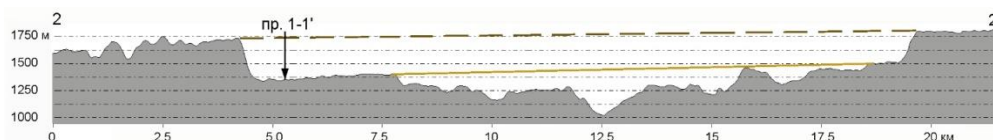


Рис. 6. Продольный профиль оползневого цирка оползня Сеймаре (см. профиль 2-2' на рис. 5)

Пунктирная темно-коричневая линия - восстановленная поверхность склона; светло-коричневая линия - предполагаемая исходная поверхность смещения на участке, где она могла быть размыта. Профиль построен в программе GlobalMapper версия 20.1 по 1' ЦМР SRTM

Таблица 3

Свойства отложений на участке развития оползня Сеймаре,
принятые при выполнении расчетов

Тип грунта	Плотность (kN/m^3)	Модель прочности	Прочность на одноосное сжатие (МПа)	GSI	mi	D
Известняки формации Асмари	26	Обобщенная Хоека-Брауна	70	50	12	0
Зона контакта между формациями Асмари и Пабдех	20	Обобщенная Хоека-Брауна	15	20	9	0
Мергель формации Пабдех	25	Обобщенная Хоека-Брауна	50	40	7	0

Количественная оценка устойчивости проводилась методами предельного равновесия (удовлетворяющих как равновесию сил, так и моментов) Моргенштерн-Прайса [Morgenstern, Price, 1965], Спенсера [Spencer, 1967] и Сарма [Sarma, 1973].

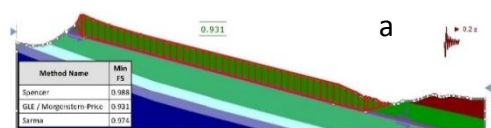
Склон на рассматриваемом участке северного склона хр. Кабиркух, где произошел оползень Сеймаре, показанный на рисунке 5, в естественных условиях (без сейсмической нагрузки) является устойчивым с $K_{уст}=1,624$ (табл. 5). Сходный результат также был получен и другими методами (Спенсера и Сарма).

Таблица 5

Результаты ретроспективной количественной оценки устойчивости склона
на участке развития оползня Сеймаре

Вариант расчета	Метод	Моргенштерн – Прайс (М-П)	Спенсер	Сарма
Расчет устойчивости склона в естественных условиях		1,624	1,694	1,678
Расчет устойчивости склона в естественных условиях с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 7 баллов		1,182	1,253	1,233
Расчет устойчивости склона в естественных условиях с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 8 баллов		0,931	0,988	0,974
Расчет устойчивости склона в естественных условиях с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 9 баллов		0,653	0,704	0,701

Количественная оценка устойчивости склона на рассматриваемом участке при сейсмическом воздействии равном $0,1g$ (7 баллов по шкале MSK-64), показала, что склон в заданных условиях и принятых характеристиках прочностных свойств отложений, сохраняет свою устойчивость (получено всеми методами). При горизонтальном сейсмическом ускорении равном $0,2g$ (8 баллов по шкале MSK-64) склон переходит в неустойчивое состояние с $K_{уст}<1,00$ (получено всеми методами) (табл. 5). На графике зависимости коэффициента устойчивости от горизонтального пикового ускорения, полученного с использованием метода Моргенштерна-Прайса (рис. 7), можно увидеть, что склон переходит из состояния предельного равновесия в неустойчивое состояние при горизонтальном пиковом ускорении равном порядка $0,17g$, что примерно соответствует 7,7 балла по шкале MSK-64. Близкие значения получены и при расчетах методами Спенсера и Сарма.



Метод расчета Минимальный Куст.
 Спенсера 0,988
 Моргенитерна-Прайса 0,931
 Сарма 0,974

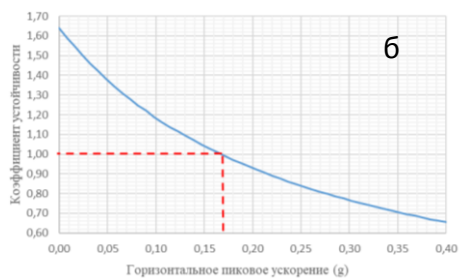


Рис. 7. Геомеханическая модель оползня Сеймаре с разбивкой массива на вертикальные блоки и результаты статического расчета устойчивости склона с горизонтальным пиковым ускорением 0,2g (8 баллов по MSK-64) (а) и зависимость коэффициента устойчивости от горизонтального пикового ускорения (б)

Результаты ретроспективной количественной оценки устойчивости склонов на участке развития грандиозного оползня Сеймаре, полученные всеми использованными методами при заданных геологических условиях и расчетных характеристиках, показали, что без сейсмического воздействия северный склон хр. Кабиркух на рассматриваемом участке являлся устойчивым. Потеря устойчивости была возможна лишь при дополнительном сейсмическом воздействии, составляющем по результатам выполненных оценок не менее 7,7 баллов по шкале MSK-64, что подтверждает ранее высказанные предположения [Berberian, 1994] о сейсмогенном характере этого оползня.

Заключение

Крупные и грандиозные доисторические скальные оползни, произошедшие на склонах хребтов, образованных антиклинальными складками и бронируемыми мощными пачками карбонатных отложений – идеальный объект для проведения обратных расчетов устойчивости склонов, так как они позволяют восстановить дооползневой рельеф с высокой степенью достоверности. Такие расчеты, выполненные для нескольких оползней объемом в десятки миллионов кубометров в горной части Дагестана, и для грандиозного оползня Сеймаре в Иране объемом около 25 км³ показали, что во всех проанализированных случаях склоны в естественных условиях были устойчивы с $K_{уст}$ составлял не менее 1,5 и могли потерять устойчивость только при сейсмических воздействиях интенсивностью не менее 7,5-8,0 баллов по шкале MSK-64. Это должно учитываться при анализе как сейсмической, так и оползневой опасности исследуемых регионов.

Необходимо учитывать, что выполненные расчеты не позволяют оценить, землетрясения какой магнитуды и на каком удалении от рассматриваемых склонов могли вызвать сотрясения такой интенсивности, поскольку интенсивность сотрясения в баллах – это интегральная оценка, не учитывающая всех особенностей сейсмического воздействия (амплитуды, длительности и частотного состава). В дальнейшем, наряду с увеличением числа исследуемых оползней, целесообразно дополнительно провести трехмерные динамические расчеты с использованием аналоговых или синтетических акселерограмм, подобранных для различных сеймотектонических условий (магнитуд и эпи- или гипоцентральных расстояний и механизмов очагов).

Литература

1. Белоусов Т.П. Рачинское землетрясение 1991 года и его проявление в рельефе Большого Кавказа. М.: Светоч Плюс, 2009. 208 с.
2. Брод И.О. и др. Геологическое строение и история геологического развития Восточного Предкавказья // Труды КЮГЭ. Вып. I. М.: Госгеолтехиздат, 1958.

3. *Зеркаль О.В., Фоменко И.К.* Оползни в скальных грунтах и оценка их устойчивости // Инженерная геология. 2016. № 4. С. 4-21.
4. Инженерная геология России. Инженерно-геологические структуры России / *В.Т. Трофимов, Т.И. Аверкина, Т.В. Андреева и др.* Том 3. М.: Издательский дом "КДУ", 2015. 710 с.
5. *Петрусеви́ч М.Н.* Аэрометоды при геологических исследованиях. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 407 с.
6. *Рогожин Е.А., Борисов Б.А., Богачкин Б.М.* Рачинское землетрясение (Грузия, 29 апреля 1991 г.): материалы геологического обследования // Докл. АН СССР, 1991. Т. 321. № 2. С. 353-358.
7. *Солоненко В.П.* Палеосейсмология // Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, 1973. № 9. С. 3-16.
8. *Федоренко В.С.* Горные оползни и обвалы и их прогноз. М.: Изд-во МГУ, 1988. 214 с.
9. *Ayub E., Kamran G., Omid S., Seyed R.T.* Stress determination and geomechanical stability analysis of an oil well of Iran // *Sadhana*. 2014. V. 39. Part 1. Pp. 207-220.
10. *Berberian M.* Natural Hazards and the first earthquake catalogue in Iran. V. 1. Historical hazards in Iran prior to 1900. IIEES, 1994. 603 p.
11. *Crozier, M.J.*, 1992. Determination of paleoseismicity from landslides. In *Landslides (Glissements de terrain)* (D. H. Bell, Ed.) // *Proc. of the 6th International Symposium, (Christchurch, New Zealand)*. - Rotterdam: A.A. Balkema, 1992. V. 2. Pp. 1173-1180.
12. *Delchiaro, M., Rouhi, J., Della Seta, M., Martino, S., Nozaem R., Dehbozorgi M.* 2020. The Giant Seymareh Landslide (Zagros Mts., Iran): A Lesson for Evaluating Multi-temporal Hazard Scenarios // *Applied Geology*/M. De Maio, A. K. Tiwari (eds.). - Springer Nature Switzerland AG, 2020, Pp. 209-225.
13. *Harrison J.V., Falcon N.L.* An ancient landslide at Saidmarreh in southwestern Iran//*Journal of Geol.* 1938. V. 46. Pp. 296–309.
14. *Hoek E.* Strength of jointed rock masses: 23th Rankine Lecture // *Geotechnique*. 1983. V. 33. №3. Pp. 187-223.
15. *Hoek E., Brown E.T.* Empirical strength criterion for rock masses // *J. Geotech Geoenvironmental. Eng Div. ASCE*. 1980. №106(GT9). Pp. 1013-1035
16. *Hoek E., Brown E.T.* Practical estimates of rock mass strength // *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.* – 1997. V. 34. №8. Pp. 1165-1186.
17. *Hoek E., Carranza-Torres C.T., Corkum B.* Hoek-Brown failure criterion-2002 edition // *Proc. of the 5th North American Rock Mechanics Symp.* Toronto, 2002. V.1. Pp. 267-273.
18. *Jibson, R.W.* Use of landslides for paleoseismic analysis // *Engineering Geology*. 1996. V. 43. №4. Pp. 291-323.
19. *Koleini M.* Engineering Geological Assessment and Rock Mass Characterization of the Asmari Formation (Zagros Range) as Large Dam Foundation Rocks in Southwestern Iran. Ph.D. Thesis, University of Pretoria, Department of Geology, 2012& URL: <https://manualzz.com/doc/21367628/engineering-geological-assessment-and-rock-mass>.
20. *Morgenstern N.R., Price V.E.* The analysis of the stability of general - slip surface // *Geotechnique*. - 1965. V. 15. №1. Pp. 70-93.
21. *Sarma S.K.* Stability analysis of embankments and slopes // *Geotechnique*. 1973. V. 23. №3. Pp. 423-433.
22. *Shoaei Z.* Mechanism of the giant Seimareh Landslide, Iran, and the longevity of its landslide dams // *Environ Earth Sci.* - 2014. V. 72. №7. Pp. 2411–2422.
23. *Spencer E.* A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces // *Geotechnique*. 1967. V. 17. Pp. 11-26.
24. *Yin Y., Wang F., Sun P.* Landslide hazards triggered by the 12May 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China // *Proc. of the 1st World Landslide Forum*. Tokyo: UNU, 2008, Parallel Session Volume. Pp. 1-17.