

ОЦЕНКА СЕЙСМОГЕННОГО ХАРАКТЕРА ОПОЛЗНЕЙ НА ОСНОВЕ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ (НА ПРИМЕРЕ ГОРНОГО ДАГЕСТАНА)

Тарабукин В.В.¹, Фоменко И.К.², Стром А.Л.^{3,4}, Зеркаль О.В.⁵, Кабирова А.Д.⁵

¹ АО «Институт «Оргэнергострой», Москва

² Российский Геолого-Разведочный Университет им. С. Орджоникидзе, Москва

³ ООО "Центр Геодинамических исследований", Москва

⁴ ООО "Институт геотехники и инженерных изысканий", Москва

⁵ Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва

Введение. Объективная оценка сейсмической опасности горных территорий, для которых исторические сведения о различных опасных природных процессах, в т.ч. о землетрясениях, имеются за сравнительно короткие периоды времени, намного меньшие, чем период повторяемости наиболее опасных сильных землетрясений, который в большинстве внутриконтинентальных районах составляет многие сотни и даже тысячи лет, невозможна без привлечения сведений о таких землетрясениях доисторического периода, т.е. палеосейсмологических данных (Солоненко, 1973; Палеосейсмология, 2011).

Одним из наиболее распространенных типов сейсмогенных остаточных деформаций являются крупные оползни в скальных массивах. Они сохраняются в рельефе и ландшафте в течение длительного времени – тысячи и десятки тысяч лет и являются одним из важных объектов палеосейсмологических исследований. В то же время известны многочисленные примеры образования аналогичных оползней без землетрясений, вследствие иных процессов. Поэтому, в отличие от поверхностных разрывов, для которых разработана подробная методика обоснования их сейсмического генезиса (Палеосейсмология, 2011), доказательство связи крупных доисторических оползней с сильными землетрясениями прошлого представляет собой сложную и, во-многом, противоречивую задачу. Многие из критериев, предложенных для обоснования сейсмического происхождения таких оползней (Солоненко, 1973; Федоренко, 1988; Croizer, 1992; Jibson, 1996) являются, как минимум, не универсальными (Strom, Abdrakhmatov, 2018), и их некритическое использование может привести к неверной оценке сейсмической опасности.

Одним из наиболее эффективных способов определить, был ли оползень спровоцирован сейсмическим воздействием той или иной интенсивности, является ретроспективный расчет устойчивости склона. При этом важнейшим условием, обеспечивающим получение надежного результата расчетов, является возможность достоверно восстановить до-оползневой рельеф, что возможно, к сожалению, далеко не всегда. Наилучшие условия для проведения таких обратных расчетов существуют при изучении оползней, произошедших на склонах хребтов, образованных крупными антиклинальными складками и бронированных пачками известняков мощностью в десятки и сотни метров, подстилаемыми менее прочными породами, в которых и формировались поверхности скольжения. Такие условия существуют, в частности в горных районах Дагестана (Брод, 1958), где выявлены многочисленные оползни в бронирующих склоны известняках нижнебарремского возраста мощностью 50-90 м, два из которых – у селения Ках (42,55°с.ш., 46,79°в.д.) и к западу от райцентра Гергебиль (42,542°с.ш., 47,028°в.д.) были выбраны для проведения ретроспективных расчетов устойчивости.

Геологические условия на участках рассматриваемых оползневых массивов.

Рассматриваемые оползни морфологически и структурно весьма схожи (Рис 1). Оба произошли на слегка изогнутых крыльях антиклиналей и охватили пачку нижнебарремских известняков мощностью 50-70 м, подстилаемую менее прочными терригенными отложениями верхнеготеривского возраста, по контакту с которыми или по менее прочному

прослою, в которых и формировалась поверхность скольжения. Оползневые тела полностью вышли из цирков, трансформировавшись в каменные лавины.

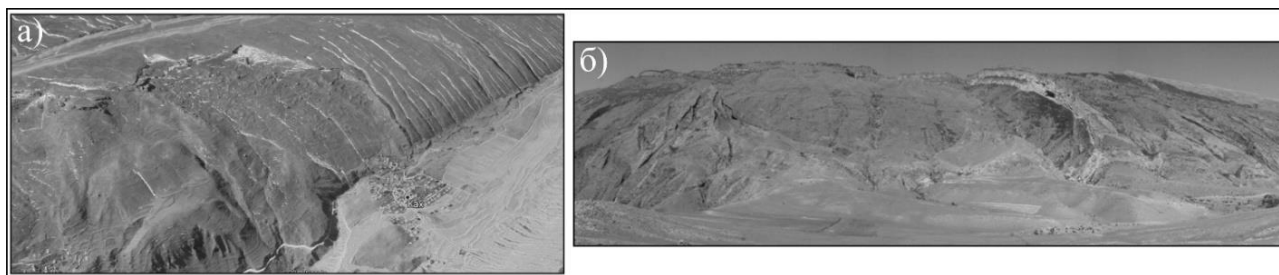


Рис. 1. а – Кахский оползень, б – Западно-Гергебильский оползень

Методика ретроспективного анализа устойчивости склонов.

Для ретроспективного анализа устойчивости склонов на начальном этапе были подготовлены геомеханические модели, учитывающие предполагаемое начальное строение склона, восстановленное исходя из его геологического строения. Для количественной оценки устойчивости были использованы широко применяемые методы предельного равновесия, удовлетворяющие как равновесию сил, так и моментов, – методы Моргенштерн-Прайса (Morgenstern, Price, 1965), Спенсера (Spencer, 1967) и Сарма (Sarma, 1973). В расчет принимались прочностные свойства наименее прочных разностей пород, развитых по контакту разновозрастных отложений (табл. 1). Учет сейсмического воздействия проводился по псевдостатической схеме – в расчет принималась величина горизонтального сейсмического ускорения. В дополнение к традиционно проводимым оценкам устойчивости склонов на основе детерминированного подхода, при ретроспективном анализе был также использован вероятностный анализ, позволяющий учитывать влияние на устойчивость склона изменчивости свойств, слагающих его отложений. Описание особенностей применения вероятностного анализа устойчивости скальных оползней можно найти в работах (Зеркаль, Фоменко, 2016, Фоменко и др., 2017, Кан, Зеркаль, 2017).

Результаты ретроспективного анализа устойчивости склонов.

На первом этапе была выполнена количественная ретроспективная оценка устойчивости склонов на рассматриваемых участках в условиях сейсмического воздействия на основе детерминированного подхода. Как показали результаты моделирования с использованием метода Моргенштерна-Прайса, склоны теряют устойчивость при дополнительном сейсмическом воздействии, составляющем не менее 9 баллов по шкале MSK-64 для участка Кахского оползня и более 8 баллов по шкале MSK-64 для участка Западно-Гергебильского оползня. Эти детерминистские оценки получены при осредненных параметрах прочностных свойств отложений верхней части готеривского яруса, в которых, как уже отмечалось, сформировалась поверхность скольжения исследованных оползней (табл. 1). Полученные результаты подтвердили сейсмогенный характер рассматриваемых оползней – Кахского и Западно-Гергебильского.

Табл. 1. Прочностные свойства скальных грунтов верхней части готеривского яруса

Тип грунта	Плотность (г/см ³)	Сцепление (кПа)			Угол вн. тр. (град.)		
		Среднее	Мин.	Макс.	Среднее	Мин.	Макс
Алевриты К ₁ h ₃	2,40	20	0	100	25	15	35

На следующем этапе, опираясь на данные по изменчивости свойств отложений, формирующих зону скольжения, был проведен вероятностный ретроспективный анализ устойчивости склонов на изучаемых участках. Геомеханические модели Кахского оползня и Западно-Гергебильского оползня, использованные при анализе, показаны на Рисунке 2.

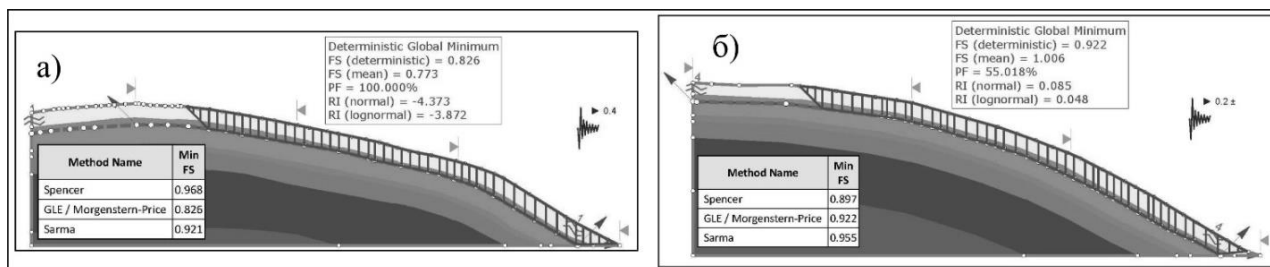


Рис. 2. Геомеханическая модель Кахского оползня (а) и Западно-Гергебильского оползня (б) с результатом расчета устойчивости склона (метод Morgenstern-Price) с учетом горизонтальных пиковых ускорений 0,4g и 0,2g, соответственно

Табл. 2. Результаты вероятностного анализа ретроспективной количественной оценки устойчивости на участке развития Кахского оползня

Вариант расчета устойчивости склона	Моргенштерн – Прайс (М-П)			Спенсер			Сарма		
	Ку Сред-ний Мин Макс	Вероят-ность смеще-ния, %	Показа-тель надеж-ности RI	Ку Сред-ний Мин Макс	Вероят-ность смеще-ния, %	Показа-тель надеж-ности RI	Ку Сред-ний Мин Макс	Вероят-ность смеще-ния, %	Показа-тель надеж-ности RI
В естественных условиях	1,85 1,45 2,39	0,00	6,122	1,87 1,595 2,49	0,00	7,390	1,80 1,45 2,19	0,00	6,325
С учетом сейсмического воздействия интенсивностью 7 баллов	1,50 1,37 1,935	0,00	4,702	1,46 1,28 1,91	0,00	4,229	1,51 1,19 1,88	0,00	5,074
С учетом сейсмического воздействия интенсивностью 8 баллов	1,15 0,92 1,26	4,85	2,055	1,22 1,09 1,60	0,00	2,502	1,26 1,01 1,65	0,00	2,438
С учетом сейсмического воздействия интенсивностью 9 баллов	0,77 0,60 0,85	100,00	-4,373	0,93 0,79 0,98	100,00	-1,925	0,94 0,77 1,21	77,744	-0,812

В Табл. 2 и 3 приведены результаты ретроспективного анализа устойчивости склонов на участках Кахского и Западно-Гергебильского оползней, соответственно, с использованием вероятностного подхода.

Результаты ретроспективной вероятностной оценки, выполненной методом Morgenstern-Price (Рис. 2а), показали, что на участке Кахского оползня за счет возможной изменчивости распределения прочностных характеристик алевролитов в массиве, существовала определенная вероятность (до 5%) потери устойчивости склоном уже при сейсмическом воздействии 8 баллов по шкале MSK-64 (табл. 2). Другие использованные методы дали результаты, близкие к результатам, полученным при использовании детерминированного варианта оценки устойчивости – развитие склоновых деформаций

возможно только при сейсмическом воздействии 9 баллов по шкале MSK-64.

Результаты ретроспективной вероятностной оценки, выполненной методом Моргенштерна-Прайса (рис. 2б), показали, что на участке Западно-Гергемильского оползня за счет возможной изменчивости распределения прочностных характеристик алевролитов в массиве, существовала определенная вероятность (0,1%) потери устойчивости склоном уже при сейсмическом воздействии 7 баллов по шкале MSK-64 (табл. 3). Другими использованными методами также был получен сходный результат. Максимальную вероятность (3,3%) потери устойчивости склоном уже при сейсмическом воздействии 7 баллов по шкале MSK-64 показали оценки методом Сарма. При сейсмическом воздействии 8 баллов по шкале MSK-64, результаты, полученные всеми методами, показывают вероятность развития смещений на рассматриваемом склоне с вероятностью от 55% до порядка 64,5%. Таким образом, результаты, полученные при ретроспективной вероятностной оценки, указывают, что за счет влияния изменчивости распределения прочностных характеристик алевролитов в массиве потеря устойчивости склоном могла произойти уже при сейсмическом воздействии 7 баллов по шкале MSK-64, что на 1 балл ниже, чем результаты, полученные при использовании детерминированного варианта оценки устойчивости – развитие склоновых деформаций возможно только при сейсмическом воздействии 8 баллов по шкале MSK-64.

Табл. 3. Результаты вероятностного анализа ретроспективной количественной оценки устойчивости на участке развития Западно-Гергемильского оползня

Вариант расчета устойчивости склона	Моргенштерн – Прайс (М-П)			Спенсер			Сарма		
	Ку Сред-ний Мин Макс	Вероят-ность смеще-ния, %	Показа-тель надеж-ности RI	Ку Сред-ний Мин Макс	Вероят-ность смеще-ния, %	Показа-тель надеж-ности RI	Ку Сред-ний Мин Макс	Вероят-ность смеще-ния, %	Показа-тель надеж-ности RI
В естественных условиях	1,41 1,02 1,91	0,00	2,807	1,42 1,16 2,01	0,00	3,794	1,40 1,1 1,915	0,00	3,094
С учетом сейсмического воздействия интенсивностью 7 баллов	1,17 0,84 1,57	0,273	1,672	1,15 0,999 1,55	0,128	1,523	1,17 0,91 1,59	3,303	1,684
С учетом сейсмического воздействия интенсивностью 8 баллов	1,01 0,91 1,315	55,018	0,085	0,99 0,89 1,30	64,466	-0,137	0,99 0,84 1,37	64,629	-0,115
С учетом сейсмического воздействия интенсивностью 9 баллов	0,73 0,65 0,98	100,00	-4,367	0,72 0,65 0,95	100,00	-4,907	0,72 0,63 0,97	100,00	-4,698

Обсуждение и выводы. Полученные результаты ретроспективной количественной оценки устойчивости склонов, выполненные как на основе детерминированного подхода, так

и с использованием вероятностного анализа, подтвердили сейсмогенный характер рассматриваемых оползней – Кахского и Западно-Гергебильского. Оценки, выполненные на основе детерминированного подхода, показали, что склоны могли терять устойчивость при сейсмическом воздействии, составляющем не менее 9 баллов по шкале MSK-64 для участка Кахского оползня и более 8 баллов по шкале MSK-64 для участка Западно-Гергебильского оползня. Вместе с тем, результаты ретроспективной количественной оценки устойчивости с использованием вероятностного анализа указывают, что за счет возможной изменчивости распределения прочностных характеристик алевролитов в массиве, потеря устойчивости, пусть и с не большой вероятностью, на участке Кахского оползня могла произойти, уже при сейсмическом воздействии в 8 баллов по шкале MSK-64, на участке Западно-Гергебильского оползня – уже при сейсмическом воздействии в 7 баллов по шкале MSK-64, что в обоих случаях на 1 балл ниже, чем величины сейсмического воздействия, полученные при оценках на основе детерминированного подхода.

При этом вопросы о возможной магнитуде таких событий, их удаленности от рассматриваемых оползней в настоящей работе не рассматривались. Для подтверждения (или опровержения) полученных выводов необходимо выполнить аналогичные ретроспективные расчеты устойчивости склонов и на других участках, где либо выявлены аналогичные оползни, либо склоны сохранили устойчивость, а также провести определение возраста исследуемых древних оползней.

Литература

- 1 Брод И.О. и др. Геологическое строение и история геологического развития Восточного Предкавказья. Труды КЮГЭ, вып. I. - М.: Госгеолтехиздат, 1958.
- 2 Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Влияние различных факторов на результаты вероятностного анализа активизации оползневых процессов//Инженерная геология. -2016. - №1. - С. 16-21
- 3 Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оползни в скальных грунтах и оценка их устойчивости//Инженерная геология. - 2016. - №4 - С.4-21.
- 4 Кан К., Зеркаль О.В. Применение вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склона//Инженерная геология. – 2017. - №4. – С. 18-26.
- 5 Палеосейсмология/под ред. Д. Мак-Калпина. в 2 т. – М.: Научный мир, 2011. – т. 1, 560 с., т. 2, 400 с.
- 6 Солоненко В.П. Палеосейсмология//Изв. АН СССР, сер. Физика Земли. – 1973. - №9. – С. 3-16.
- 7 Федоренко В.С. Горные оползни и обвалы и их прогноз. – М.: Изд-во МГУ, 1988. - 214 с.
- 8 Фоменко И.К., Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Сироткина О.Н. Вероятностный анализ устойчивости скальных оползней//Инженерная геология Северо-Западного Кавказа и Предкавказья: современное состояние и основные задачи/Матер. III региональной научно-практ. конф. (Краснодар, 24-25.11.2016). – Краснодар: Изд-во Кубан. гос. ун-т, 2016. - С. 268-272.
- 9 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.
- 10 Jibson, R.W. Use of landslides for paleoseismic analysis//Engineering Geology. – 1996. – v. 43. - №4. – pp. 291-323.
- 11 Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general - slip surface//Geotechnique. - 1965. – v. 15. - №1. - pp. 70-93.
- 12 Sarma S.K. Stability analysis of embankments and slopes//Geotechnique. – 1973. - v. 23. - №3. - pp. 423-433.
- 13 Spencer E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces//Geotechnique. – 1967. – v. 17. – pp. 11-26.
- 14 Strom A., Abdrakhmatov K. 2018. Rockslides and rock avalanches of Central Asia: distribution, morphology, and internal structure. - Elsevier, 2018. – 450 p. ISBN: 978-0-12-803204-6