

УЧЕТ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ (на примере Краснополянского геодинамического полигона)

ФОМЕНКО И.К.

«Галф интерстейт
инжиниринг компани»

ЗАХАРОВ В.С.

МГУ им. М.В. Ломоносова,
геологический факультет,
кафедра динамической геологии

САМАРКИН-ДЖАРСКИЙ К.Г.

ООО «Инжзащита»

СИРОТКИНА О.Н.

МГУ им. М.В. Ломоносова,
геологический факультет,
кафедра динамической геологии

Ключевые слова: устойчивость оползневого склона, сейсмическая нагрузка, сейсмическое воздействие, равновесие моментов, равновесие сил, псевдостатический анализ, динамический анализ.

Аннотация: расчет устойчивости склонов в сейсмических районах должен производиться с учетом силы возможных землетрясений. Был выполнен расчет устойчивости одного из оползневых склонов, расположенных в районе Красной Поляны в долине реки Мzymта. При этом было использовано несколько вариантов расчета, предназначенных для неоднородных склонов. Дополнительно к ним был также применен метод конечных элементов. Сейсмическое воздействие учитывалось на основе использования псевдостатического и динамического анализа. Анализ полученных результатов позволил выявить на склоне три потенциально оползневых участка с пониженными значениями коэффициента устойчивости склона K_y . Делается вывод, что при модельном сейсмическом событии

активизация оползневых процессов произойдет практически на всем оползневом склоне.

Key words: landslide slope stability, seismic load, seismic effect, the balance of moments, the balance of forces, pseudostatic analysis, dynamic analysis.

Abstract: The calculation of slope stability in seismic areas should be made taking into account the strength of possible earthquakes. The stability of a landslide slope located in the area of Krasnaya Polyana in the valley of Mzymta river was calculated. Several variants of the calculation for heterogeneous slopes were used. In addition to them the finite element method was also used. The seismic effect was taken into account using pseudostatic and dynamic analysis. Three potential landslide areas of the slope having the reduced slope stability coefficient were revealed. It is concluded that the landslide activation will occur on all the slope during the model seismic event.

Характеристика объекта исследований

Расчет устойчивости склонов в сейсмических районах должен производиться с учетом силы возможных землетрясений. В качестве расчетного в данной статье был выбран один из оползней, расположенный в районе Красной Поляны в долине реки Мzymта (рис. 1). В геологическом строении данного оползневого склона принимают участие современные элювиальные и

пролювиальные отложения, подстилаемые алевролитами пониженной прочности юрского возраста. Элювиальные отложения представлены щебенистыми и дресвяными грунтами — продуктом выветривания аргиллитов с сохранением структуры. Пролювиальные отложения более разнообразны. Толщи пролювиальных отложений, залегающие на элювиальном комплексе, в основании представлены щебенисто-галечниковыми и в меньшей степени дресвяно-гравийными грунтами с су-

глинистым заполнителем. В верхней части склона на щебенисто-галечниковых отложениях развиты суглинки тугопластичные, выше сменяющиеся полутвердыми. В средней и нижней части склона верхняя часть разреза пролювиальных отложений представлена тугопластичными и полутвердыми суглинками с дресвой и щебнем. По всему разрезу встречается обломочный материал валунной размерности. В центральной части склона в кровле пролювиального комплекса развиты

Таблица 1

Нормативные показатели физико-механических свойств грунтов				
Наименование грунта	Плотность грунта природной влажности, г/см ³	Модуль общей деформации, МПа	Угол внутреннего трения, °	Удельное сцепление, кПа
Техногенный грунт — суглинок полутвердый щебенистый	2,04	27,02	21,71	26,85
Суглинок тугопластичный	1,94	13,41	9,41	17,49
Суглинок тугопластичный дресвяный	1,98	17,43	20,61	17,25
Суглинок тугопластичный щебенистый	2,00	21,59	20,63	12,80
Суглинок полутвердый	1,97	18,54	11,64	19,86
Суглинок полутвердый дресвяный	2,00	24,35	19,89	30,24
Суглинок полутвердый щебенистый	2,05	28,23	21,92	23,63
Дресвяный грунт	2,10	30,46	24,03	13,70
Дресвяный грунт (продукт выветривания аргиллита с сохранением структуры)	2,28	46,86	2,46	64
Щебенистый грунт	2,16	35,00	26,53	10,55
Щебенистый грунт (продукт выветривания аргиллита с сохранением структуры)	2,33	46,86	2,46	64
Полускальные осадочные грунты пониженной прочности (аргиллиты)	2,53	583,66	12,8	575

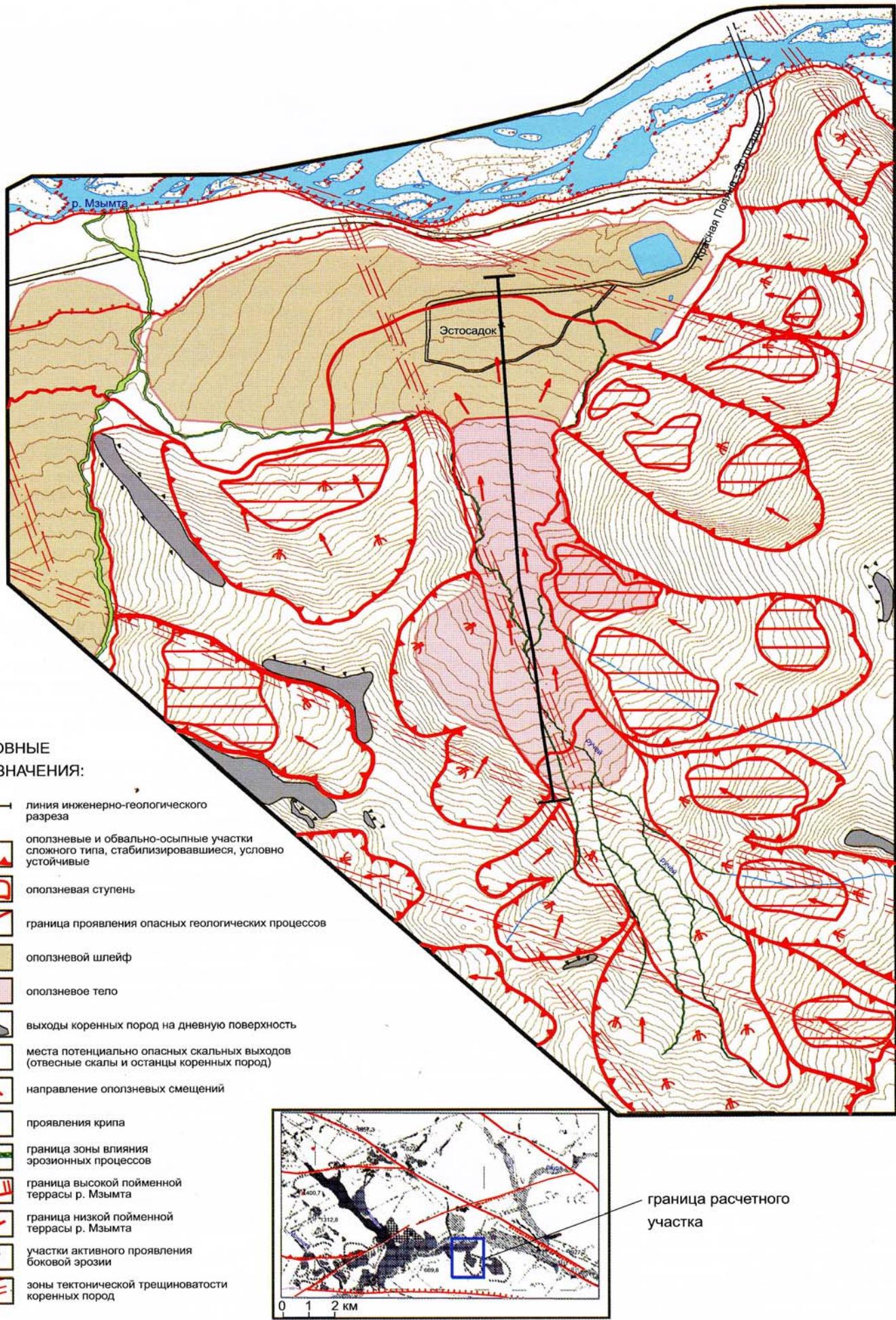


Рис. 1. Схема современных геологических процессов расчетного участка. На врезке положение расчетного участка в пределах обвално-оползневых массивов, расположенного в долине р. Мzymта

Таблица 2

Оценка устойчивости расчетного склона без учета сейсмического воздействия

№ расчетной плоскости скольжения	Тип оползневого процесса	Коэффициент устойчивости склона					Оценка устойчивости склона
		Метод Моргенштерна — Прайса	Метод Филениуса	Метод Бишопа	Метод Янбу	МКЭ	
1	Оползневый склон	1,773	1,787	1,788	1,719		Устойчив
2	Оползневый склон	2,583	2,214	2,47	2,375	1,6	Устойчив
3	Оползневый склон	2,263	2,159	2,216	2,115		Устойчив

Таблица 3

Оценка устойчивости расчетного склона с учетом сейсмического воздействия

№ расчетной плоскости скольжения	Тип оползневого процесса	Коэффициент устойчивости склона					Оценка устойчивости склона
		Метод Моргенштерна — Прайса	Метод Филениуса	Метод Бишопа	Метод Янбу	МКЭ	
1	Оползневый склон	0,603	0,58	0,608	0,579		Неустойчив
2	Оползневый склон	1,247	1,064	1,162	1,113	0,58	В состоянии предельного равновесия
3	Оползневый склон	0,827	0,782	0,822	0,794		Неустойчив

глыбовые отложения незначительной мощности (0,5 м). На склоне ограничено представлены техногенные грунты. Мощность пролювиальных отложений меняется от 6 м в верхней части склона до более чем 22 м у подножия.

Инженерно-геологический разрез рассматриваемого оползневого склона представлен на рис. 2.

Физико-механические свойства грунтов, закладываемые в расчет устойчивости оползневого склона, приведены в табл. 1.

Свойства элювиальных и полускальных пород были определены на основе модели Хоека — Брауна в бесплатной программе RockLab (<http://www.rockscience.com>).

Методы расчета устойчивости склонов

В настоящее время существует достаточно много методов расчета устойчивости склонов. Выбор тех или иных методов в первую очередь определяется типом оползневого процесса и механизмом возможного смещения оползневых масс. Каждый оригинальный способ расчета характеризуется своей оригинальной системой сил, полученной в данном способе с использованием того или иного допущения (необходимость которого связана со статической неопределенностью задачи). При общем подходе эти методы можно разделить на три основные группы в зависимости от числа уравнений равновесия, которые удовлетворяются ими: (1) группа методов, которая удовлетворяет общему равновесию моментов; (2) группа методов, которая удовлетворяет общему равновесию сил; (3) группа методов, которая удовлетворяет общему равновесию моментов и сил.

В данной работе были использованы следующие варианты расчета, предна-

значенные для неоднородных склонов: метод Филениуса, упрощенный метод Бишопа, упрощенный метод Янбу и метод Моргенштерна — Прайса. Дополнительно к ним был также применен метод конечных элементов.

Учет сейсмического воздействия

Сейсмическая нагрузка при оценке устойчивости оползневых и оползнеопасных склонов может быть учтена на основе использования следующих подходов: (1) псевдостатического анализа; (2) динамического анализа.

При псевдостатическом анализе эффект от землетрясения моделируется путем введения дополнительной силы, определяемой следующим образом:

$$F = \frac{aW}{g} = kW, \quad (1)$$

где a — горизонтальное сейсмическое ускорение; g — ускорение свободного падения; W — удельный вес грунта; k — коэффициент сейсмичности.

При динамическом анализе расчет основывается на данных акселерограммы, что позволяет принимать во внимание продолжительность и интенсивность землетрясения. Данный метод позволяет получить более реалистичную оценку эффектов от сейсмического воздействия на потенциально неустойчивый скальный склон.

Решение задачи расчета устойчивости склона с учетом сейсмического воздействия в GeoStudio осуществляется в два этапа: (1) статический анализ, когда в программном модуле QUAKE/W решается задача расчета напряжений и деформаций в естественном состоянии; (2) динамический анализ, проводящийся при прохождении в массиве горных пород сейсмических волн.

Расчет, полученный в результате статического анализа, является на-

чальным условием для проведения динамического анализа.

В основе динамического анализа лежит конечно-элементное решение уравнения движения следующего вида:

$$[K]\{d\} + [D]\{v\} + [M]\{a\} = \{F\}, \quad (2)$$

где d — смещение; v — скорость; a — ускорение; $[K]$ — матрица жесткости; $[D]$ — матрица затухания колебаний; $[M]$ — матрица масс; $\{F\}$ — вектор узловых сил.

Полученные результаты используются при расчете устойчивости склона.

Построение геомеханической модели

Построение геомеханической модели склона с целью оценки его устойчивости включало следующие этапы.

Для расчетного склона создавалась геометрическая модель — схематическое представление строения реально-го объекта, его типовое разделение на отдельные слои и структурные элементы. Основой для геометрической модели послужил инженерно-геологический разрез, построенный по наиболее вероятному направлению развития оползневого процесса. В расчетах были использованы следующие модели поведения грунтов: (1) упругопластическая модель поведения грунтов Мора — Кулона; (2) модель поведения грунтов Хоека — Брауна.

Результаты расчета устойчивости оползневого склона

Расчет устойчивости выполнялся по следующим вариантам: (1) без учета сейсмического воздействия; (2) с учетом сейсмического воздействия на основе динамического анализа; (3) с учетом сейсмического воздействия на основе псевдостатического анализа.

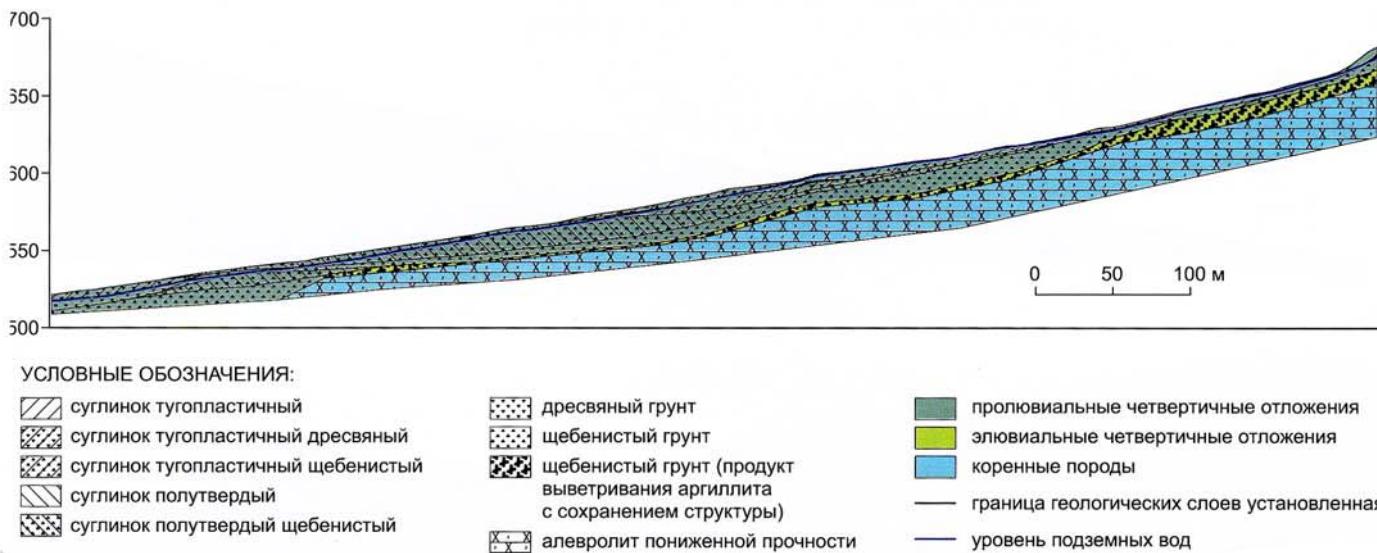


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез оползневого склона

Результаты расчета устойчивости без учета сейсмического воздействия

Итоговая геомеханическая схема с результатами оценки устойчивости склона по методу Моргенштерна — Прайса приведена на рис. 3. Сравнение

результатов, полученных различными методами, представлено в табл. 2.

Результаты расчета устойчивости с учетом сейсмического воздействия на основе динамического анализа

Для расчета устойчивости оползневого склона с учетом сейсмического воз-

действия на основе динамического анализа были использованы данные по Рачинскому землетрясению ($M_s = 6,9; M_w = 6,8; H = 5 \text{ км}$), которое произошло 29.04.1991 г. В этом регионе это последнее сильное землетрясение. Запись была сделана на станции Akhalka-

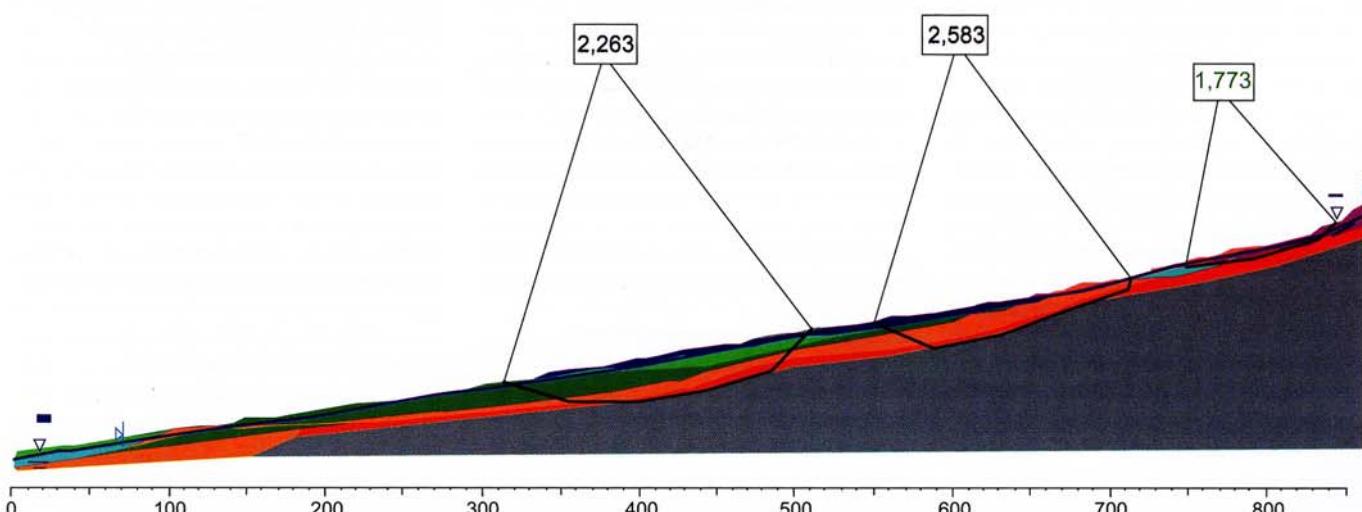


Рис. 3. Геомеханическая схема с результатами оценки устойчивости склона по методу Моргенштерна — Прайса (без учета сейсмического воздействия). Цветом показаны типы грунтов, черные линии на разрезе — вероятные плоскости скольжения оползневых тел, цифры над разрезом — коэффициент устойчивости склона

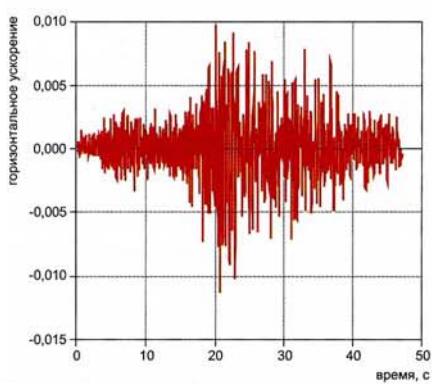


Рис. 4. Акселерограмма горизонтальных ускорений

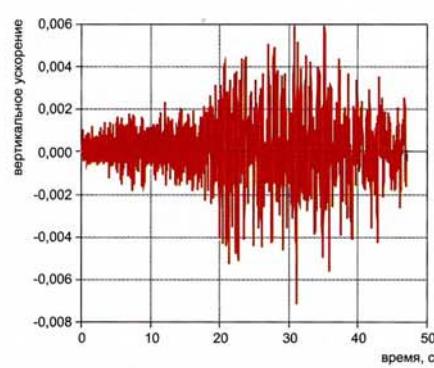


Рис. 5. Акселерограмма вертикальных ускорений

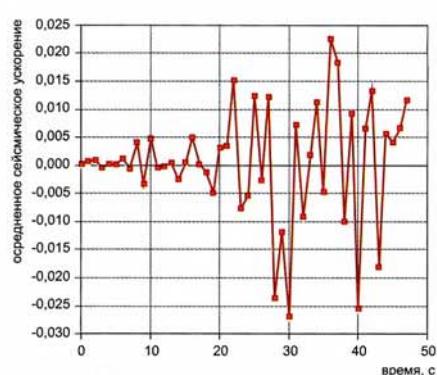


Рис. 6. Осредненная акселерограмма

а

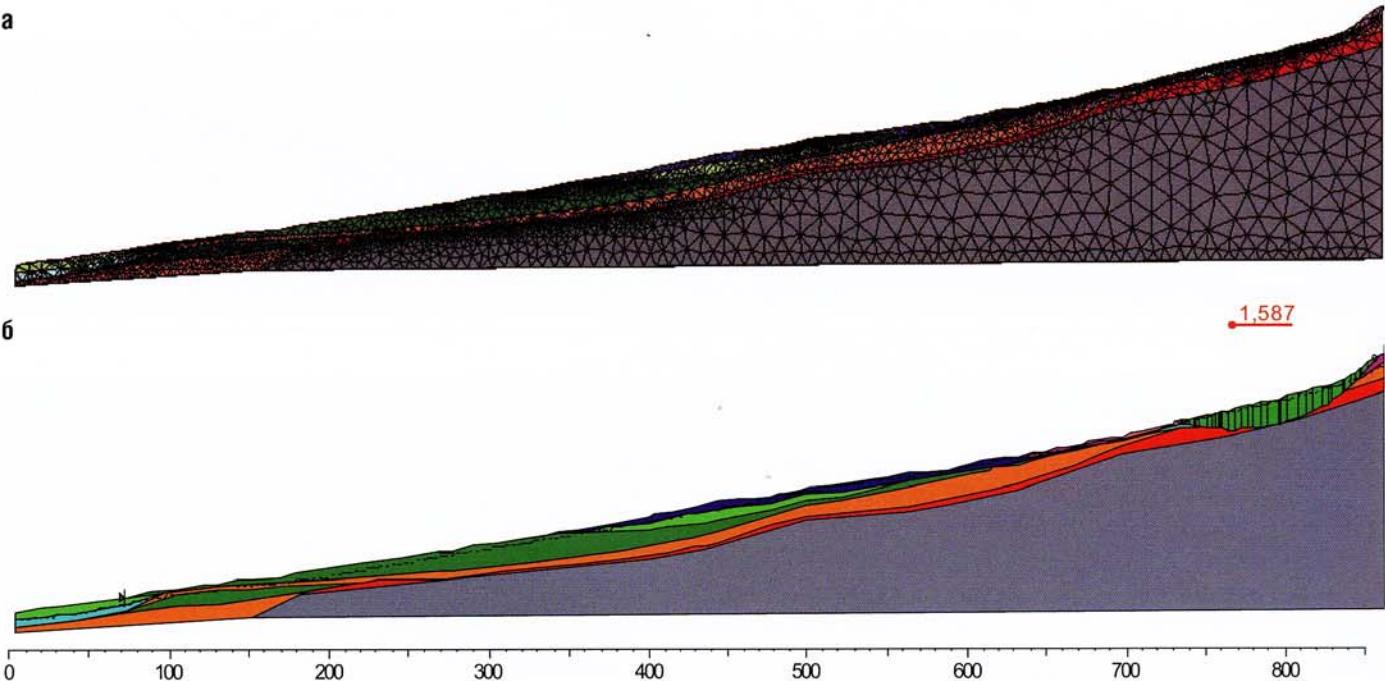


Рис. 7. Конечно-элементная модель (а). Цветом показаны типы грунтов, черные линии на разрезе — конечно-элементная сетка. Геомеханическая схема (б) с результатами оценки устойчивости склона на основе динамического анализа. Цветом показаны типы грунтов, вертикальная штриховка на разрезе — вероятное оползневое тело, цифра над разрезом — коэффициент устойчивости склона

Iaki (удаленность от очага землетрясения 115 км). Акселерограммы, использованные при расчете, приведены на рис. 4, 5.

О среднененная в процессе анализа акселерограмма приведена на рис. 6. Конечно-элементная модель и итоговая геомеханическая схема с результатами оценки устойчивости склона на основе динамического анализа приведена на рис. 7, график зависимости коэффициента устойчивости склона K_y от времени сейсмического воздействия — на рис. 8, график зависимости K_y от осредненного сейсмического ускорения — на рис. 9.

Результаты расчета устойчивости с учетом сейсмического воздействия на основе псевдостатического анализа

Расчет устойчивости оползневого склона с учетом сейсмического воздействия на основе псевдостатического анализа был проведен для 8-балльного

землетрясения. В расчет были заложены следующие величины сейсмических ускорений (в долях g): (1) горизонтальная составляющая — $0,2 g$; (2) вертикальная составляющая — $0,1 g$.

Итоговая геомеханическая схема с результатами оценки устойчивости склона по методу Моргенштерна — Прайса приведена на рис. 10. Сравнение результатов, полученных различными методами, представлено в табл. 3.

Анализ результатов и выводы

Произведенные расчеты позволяют сделать следующие выводы.

В естественном состоянии расчетный оползневый склон является устойчивым. Анализ полученных результатов позволяет выявить на склоне три потенциально оползневых участка с пониженными значениями коэффициента устойчивости склона K_y (в районе

750 м, в районе 500 м и в районе 310 м). Глобальный минимум K_y находится в верхней части склона (в районе 750 м). Таким образом, можно сделать предположение, что наиболее вероятный механизм активизации оползневого процесса будет происходить сверху вниз. Активизировавшиеся в верхней части склона, сместившиеся оползневые массы могут нагрузить верхнюю часть следующего потенциально оползневого участка и тем самым спровоцировать его активизацию. По аналогии сместившиеся оползневые массы со второго участка активизируют оползневой процесс на третьем участке.

Расчет устойчивости оползневого склона с учетом сейсмического воздействия на основе динамического анализа на примере Рачинского землетрясения показал, что данное сейсмическое событие не привело к активизации оползневых процессов в основном теле оползня. Однако анализ схемы современных геологических процессов расчетного участка (см. рис. 1) позволяет сделать предположение об активизации вторичных оползневых процессов, приуроченных к бровкам срыва основного оползневого тела в результате Рачинского землетрясения.

Расчет устойчивости оползневого склона с учетом сейсмического воздействия на основе псевдостатического анализа (горизонтальная составляющая сейсмического воздействия — $0,2 g$; вертикальная составляющая — $0,1 g$) в целом подтвердил предположения, сделанные при расчете без

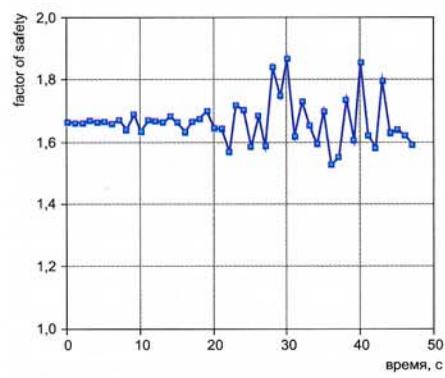


Рис. 8. График зависимости K_y от времени сейсмического воздействия

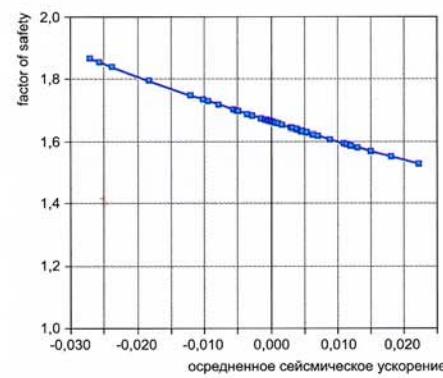


Рис. 9. График зависимости K_y от осредненного сейсмического ускорения

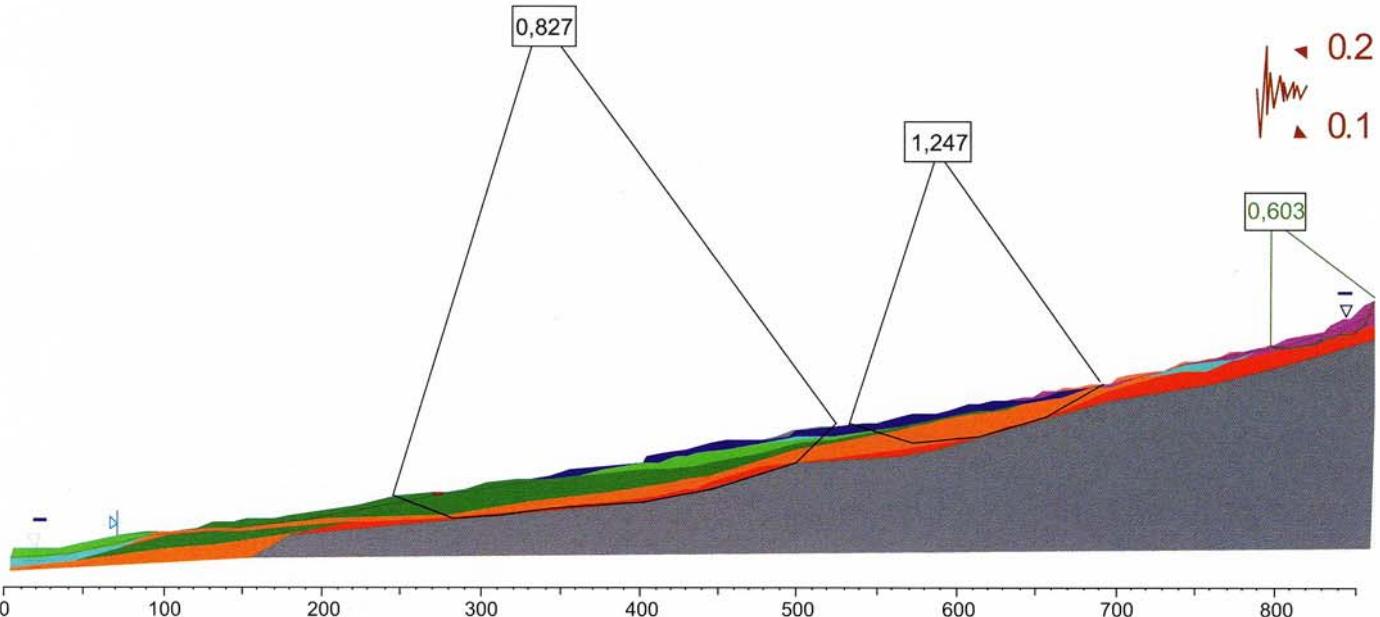


Рис. 10. Геомеханическая схема с результатами оценки устойчивости склона по методу Моргенштерна – Прайса (с учетом сейсмического воздействия методом псевдостатического анализа). Цветом показаны типы грунтов, черные линии на разрезе – вероятные плоскости скольжения оползневых тел, цифры над разрезом – коэффициент устойчивости склона

учета сейсмического воздействия. Анализ полученных результатов также позволяет выявить на склоне три потенциально оползневых участка с пониженными значениями K_y (в районе 780 м, в районе 500 м и в районе 210 м). Они несколько смещены относительно расчета, проведенного для естественного состояния склона. Глобальный минимум K_y находится в верхней части склона (в районе 780 м). Предположению, сделанному ранее, несколько противоречит анализ расчетов устойчивости для разных участков склона. Так, в результате модельной сейсмической нагрузки в неустойчивое состояние переходят верх-

ний и нижний участки склона, средний же участок переходит в состояние предельного равновесия. Таким образом, данный расчет не согласуется с предположением о вероятном развитии оползневого процесса сверху вниз — и механизм активизации оползня должен быть представлен следующим образом: в момент сейсмического события активизируются верхний и нижний участки склона, что, как следствие, приведет к активизации среднего участка. Однако в природе сейсмическое событие такой величины не наступает мгновенно, и с учетом динамики сейсмического события все же более вероятным представляется раз-

витие оползневого процесса сверху вниз по схеме, описанной для естественного состояния оползневого склона.

Вне зависимости от механизма смещения оползневых масс анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что при модельном сейсмическом событии активизация оползневых процессов произойдет практически на всем оползневом склоне. Величина возможных оползневых смещений на основе анализа с использованием метода конечных элементов может быть приблизительно оценена в 40 м, минимальный K_y соответствует величине оползневого смещения в 1,083 м.