

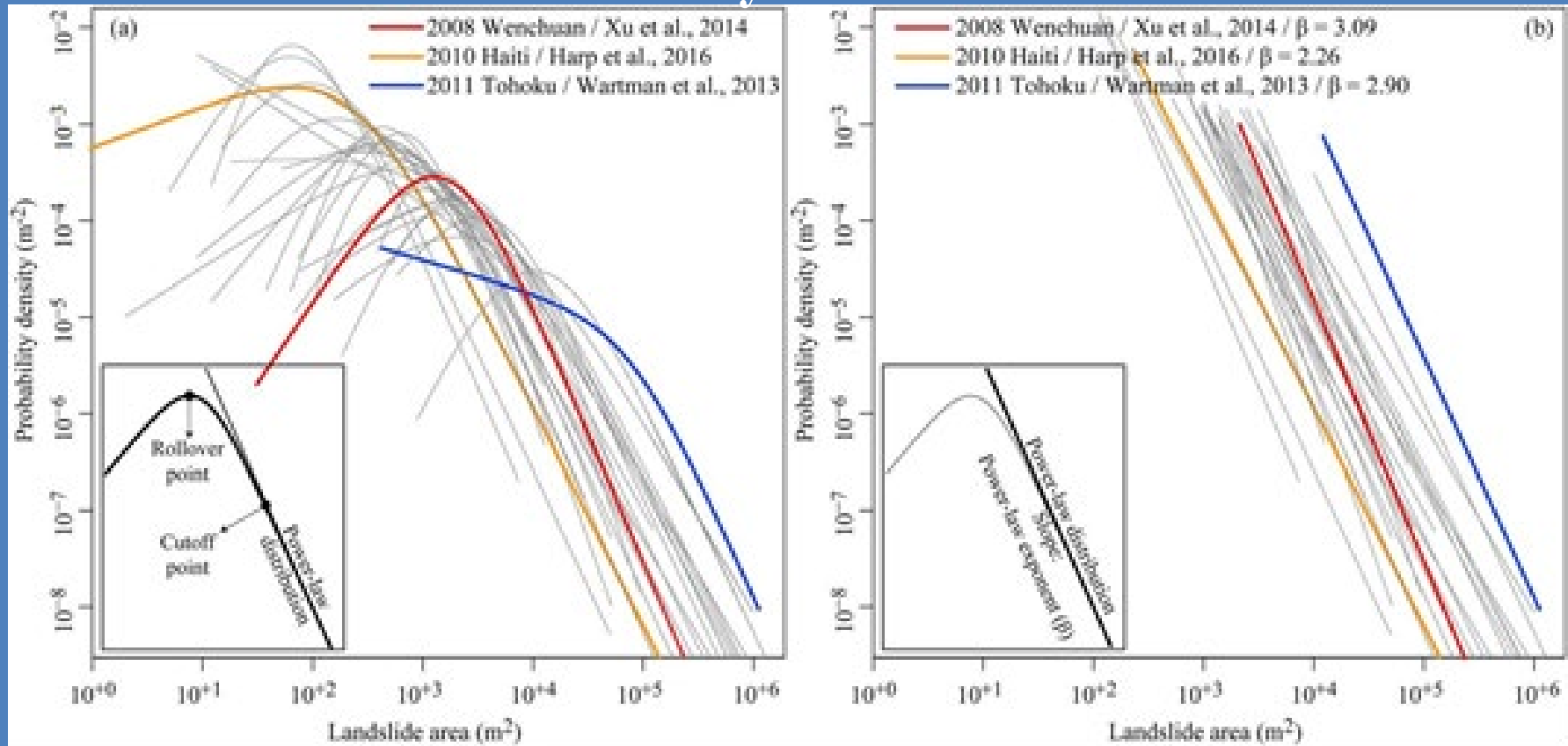


Особенности учета сейсмического воздействия при оценке устойчивости склонов

Фоменко И.К., Зеркаль О.В., Никифоров С.П., Сироткина О.Н.

Москва 2019

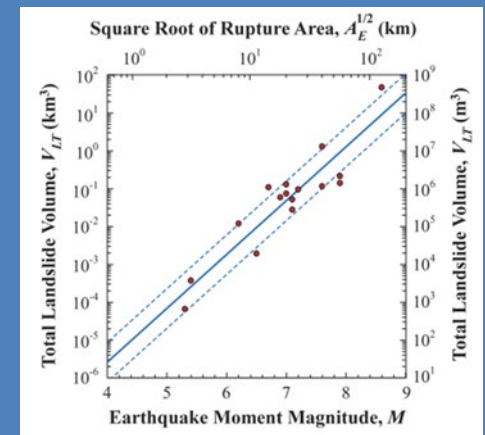
Актуальность



(Malamud и др., 2004; Tanyas, van Westen, и др., 2018)

$$f = cA^\beta,$$

$$V_L = \varepsilon A_L^{1.50}$$



Типы сейсмогенных оползней

Косейсмические оползни

Постсейсмические оползни

Существующие методы и подходы

Учет сейсмического воздействия может быть осуществлен тремя способами:

- ❑ интуитивного подхода
- ❑ псевдостатического анализа
- ❑ динамического анализа

Сегодня в России при расчете устойчивости склонов с учетом сейсмического воздействия можно встретить подходы, изложенные в «Предложениях по расчету устойчивости откосов высоких насыпей и глубоких выемок» (1966 г.).

НАПРИМЕР

- ОДМ 218.2.053-2015 «Рекомендации по оценке сейсмического воздействия при определении устойчивости оползневых участков автомобильных дорог»
- СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» (п.п. 6.13.3 метод фиктивного сейсмического угла).

Согласно «Предложениям по расчету устойчивости откосов высоких насыпей и глубоких выемок» раздел VI (УЧЕТ В РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ) составлен на основе работы:

Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. - М., Автотрансиздат, 1961.

Вопрос – какое отношение имеет описанный в данном документе подход к шкале MSK 64?

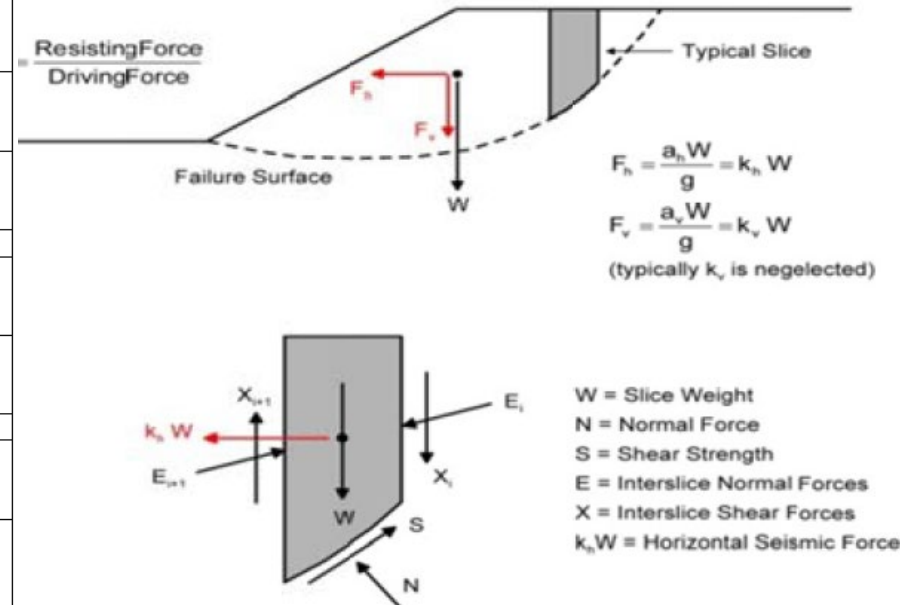
Псевдостатический анализ

При псевдостатическом анализе эффект от землетрясения моделируется путем введения дополнительных инерционных сил.

ВЕЛИЧИНА СЕЙСМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА

Investigator	Recommended Pseudo static Coefficient (k)	Recommended factor of safety (FS)	Calibration conditions
Terzhagi [8]	0.1(R-F=IX)	>1.0	Unspecified
	0.2(R-F=X)		
	0.5(R-F>X)		
Seed (1979) [16]	0.10(M=6.50)	> 1.15	<1 m displacement in earth dams
	0.15 (M=8.25)		
Marcuson (1981) [17]	0.33-0.50 PGA/g	>1.0	Unspecified
Hynes- Griffin and Franklin (1984) [18]	0.5 PGA/g	>1.0	<1 m displacement in earth dams
California Division Of Mines and Geology (1997)	0.15	>1.1	Unspecified: probably based on <1 m displacement in dams
JCOLD Japan	0.12-0.25		
Corps of Engineering	0.1 (Major Earthquake)	>1	Unspecified
	0.15 (Great Earthquake)	>1	
IRI Road and Railway Bridges Seismic Resistant Design Code NO: 463	0.5 A	>1	Unspecified
Indian standard for Seismic design of earth	0.33 Z I S	>1	Unspecified

R-F	is Rossi –Forel earthquake intensity scale.
M	is earthquake magnitude.
PGA	is Peak Ground Acceleration.
G	is acceleration of gravity.
A	is ratio of design acceleration to acceleration of gravity (0.2 to 0.35)
Z	is zone factor (0.1 to 0.36)
I	importance factor (1.0 to 2.0)
S	site amplification factor (1.0 to 2.0)



B. Nadi et al.

Псевдостатический анализ

ОДМ 218.2.053-2015 «Рекомендации по оценке сейсмического воздействия при определении устойчивости оползневых участков автомобильных дорог»

Т а б л и ц а 4 – Значения коэффициента сейсмичности

Расчетная сейсмичность в баллах	7	8	9
Коэффициент сейсмичности μ	0,025	0,050	0,100

СП 14.13330.2018 «сейсмические ускорения следует принимать равными 1,0; 2,0 или 4,0 м/с² при сейсмичности площадок строительства 7, 8 и 9 баллов соответственно».

Там же (п.п. 5.17) «При расчете подпорных стен необходимо учитывать сейсмическое давление грунта, значение которого допускается определять с применением квазистатических расчетных схем, принимая ускорение грунта равным произведению $K_0 \cdot K_1 \cdot A$. Допускается принимать $K_1 = 0,5$ при отсутствии других данных.

Там же «При расчете устойчивости откосов сооружений из грунтовых материалов и склонов с применением ЛСТ сейсмические силы, действующие на сдвигаемую часть откосов и склонов, допускается определять инженерными методами (с учетом примененных методов проверки устойчивости)».

ВЫВОД: в России отсутствует обоснованный подход учета сейсмического воздействия при расчете устойчивости склонов

Псевдостатический анализ согласно Еврокоду

Расчетные сейсмические силы инерции F_H и F_V , действующие на грунтовый массив, соответственно в горизонтальном и вертикальном направлении, при псевдостатическом анализе записываются в виде:

$$F_H = 0,5\alpha \cdot W,$$

$$F_V = \pm 0,5F_H, \text{ если отношение } a_{vg}/a_g \text{ больше } 0,6;$$

$$F_V = \pm 0,33F_H, \text{ если отношение } a_{vg}/a_g \text{ меньше либо равно } 0,6;$$

где α – отношение расчетного ускорения грунта a_g , к ускорению силы тяжести;

a_{vg} – расчетное ускорение грунта в вертикальном направлении;

W – вес оползающего массива.

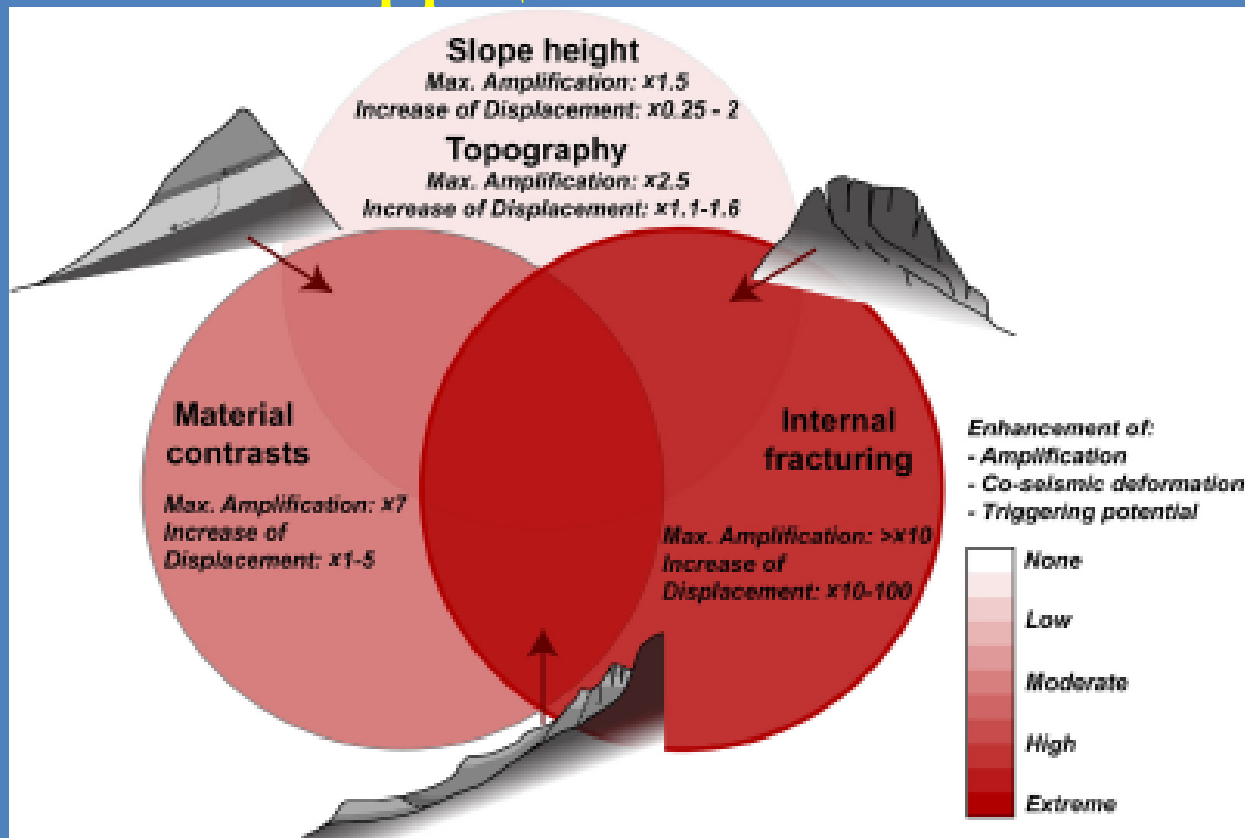
При определении знака в формуле для расчета силы инерции, действующий в вертикальном направлении F_V , следует исходить из принципа наиболее неблагоприятного сочетания, т.е. знак выбирается такой, при котором коэффициент устойчивости склона/откоса будет меньше.

Дополнительно вводятся два коэффициента: на сейсмические свойства грунтов и топографический фактор.

Условие предельного состояния должно затем быть проверено по наименее надежной потенциальной поверхности скольжения.

Однако, данный подход является слишком упрощенным и не в достаточной степени обоснованным.

Псевдостатический анализ. Факторы влияющие на коэффициент сейсмичности



Valentin S. Gischig, Erik Eberhardt, Jeffrey R. Moore, Oldrich Hungr

- 1) Увеличение сейсмичности за счет геометрии склона (высота склона, рельеф)
- 2) Увеличение сейсмичности за счет контраста свойств грунтов
- 3) Увеличение сейсмичности за счет трещиноватости.

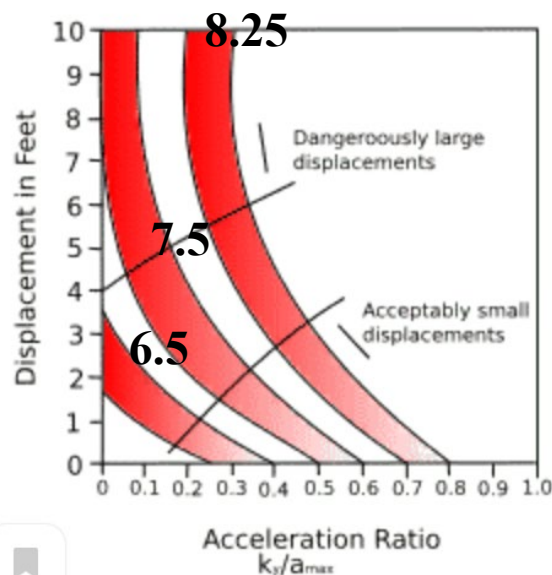
Оценка величины сейсмического коэффициента (приближение 1).

Псевдостатический и динамический анализ.

Связь перемещений, полученных по методу Ньюмарка с K_u , полученному на основе псевдостатического анализа

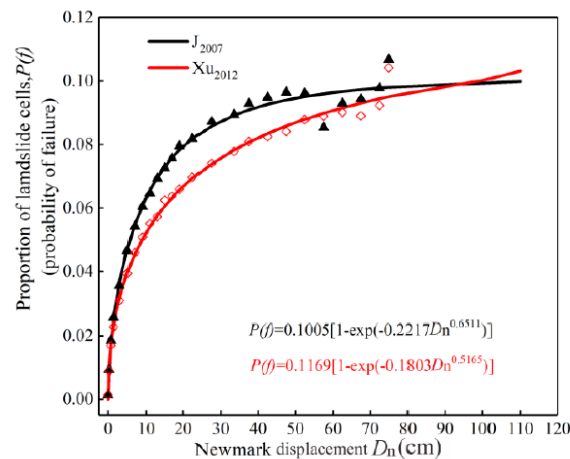
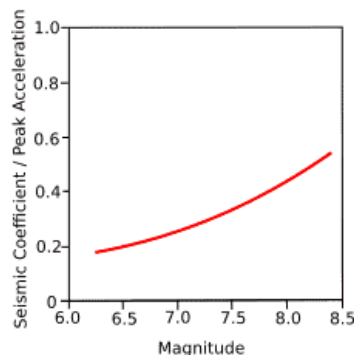
Для землетрясения магнитудой 8,25 склон останется устойчивым, если критический сейсмический коэффициент по меньшей мере равен половине ожидаемого пикового ускорения. И наоборот, если псевдостатический анализ с использованием сейсмического коэффициента, равного половине пикового ускорения, дает коэффициент безопасности, превышающий 1,0, то смещения, вероятно, будут приемлемо малыми. Аналогично, для магнитуд 7.5, 7.0 и 6.5, если сейсмический коэффициент принимается за одну треть, одну четвертую и одну пятую от ожидаемого пикового ускорения, а вычисленный коэффициент безопасности больше 1,0, смещения, вероятно, будут приемлемо малыми.

Typical Displacements
Computed by Newmark Method
after Makdisi and Seed (1978)



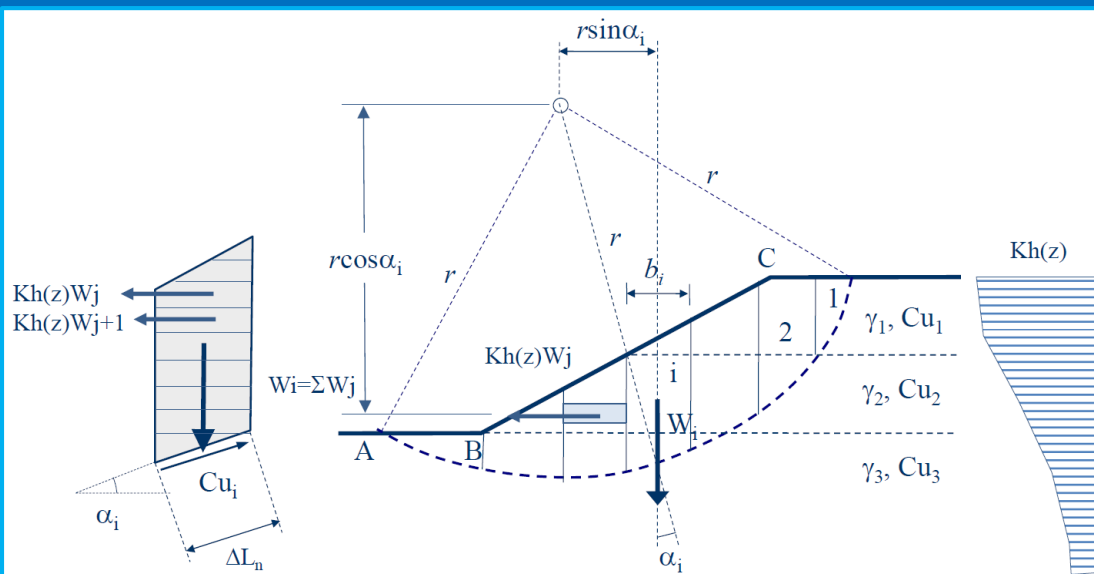
Полученные таким образом сейсмические коэффициенты представлены на Рис. в виде функции пикового ускорения и амплитуды.

Magical Curve for Obtaining
Seismic Coefficient
from Peak Acceleration



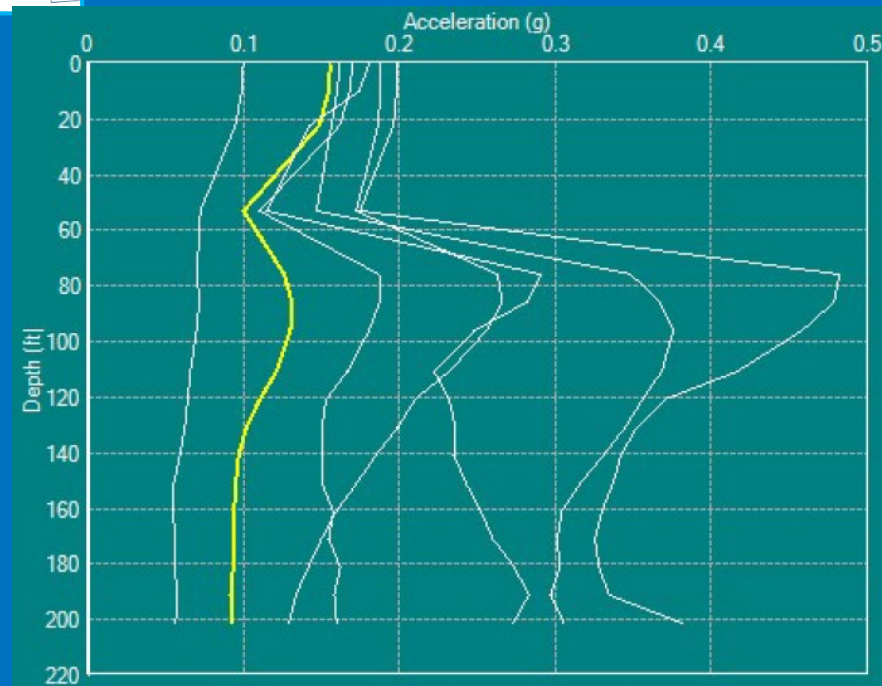
Оценка величины сейсмического коэффициента (приближение 2).

Изменение коэффициента сейсмичности с глубиной.



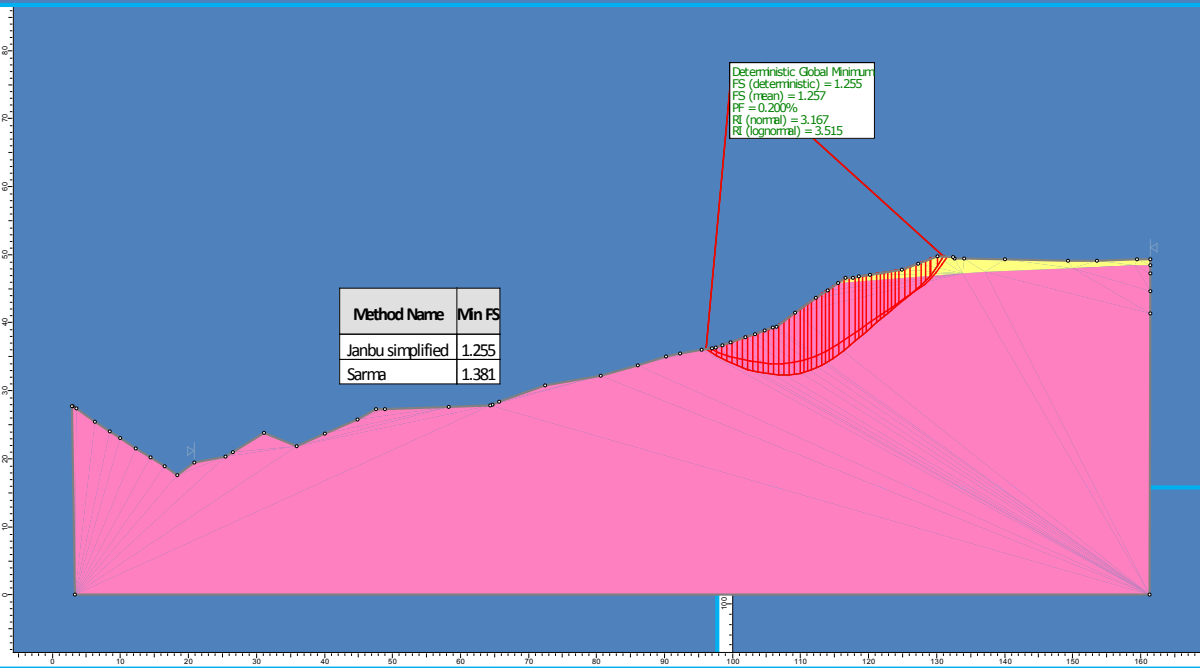
По Mourad Karray et al. 2017

$$k_{hz} = k_{h0} [1 + 2(z / H_t)^2]$$



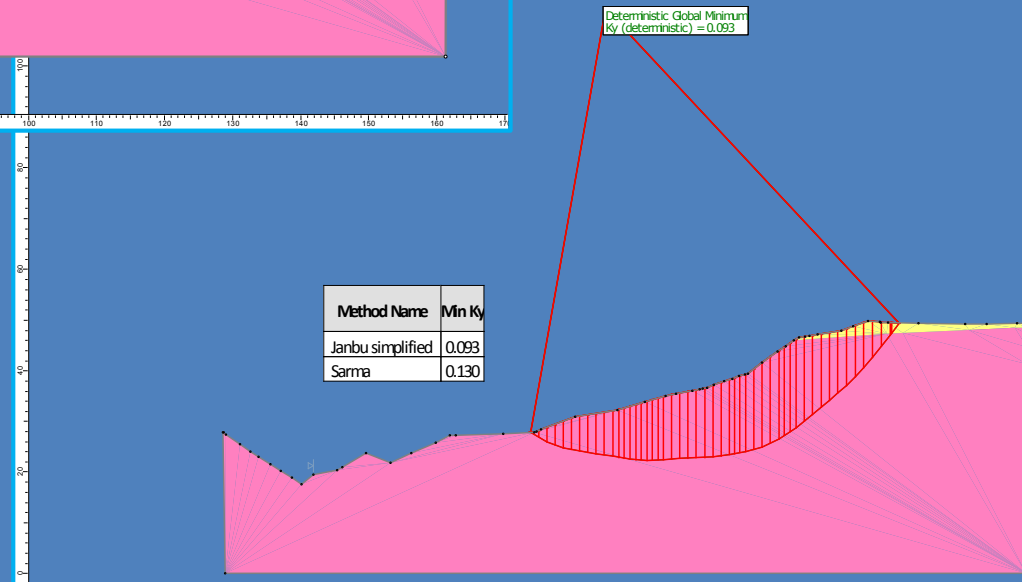
Оценка величины сейсмического коэффициента (приближение 3).

Влияние метода расчета на величину начального сейсмического ускорения (A_0) при котором склон теряет устойчивость.

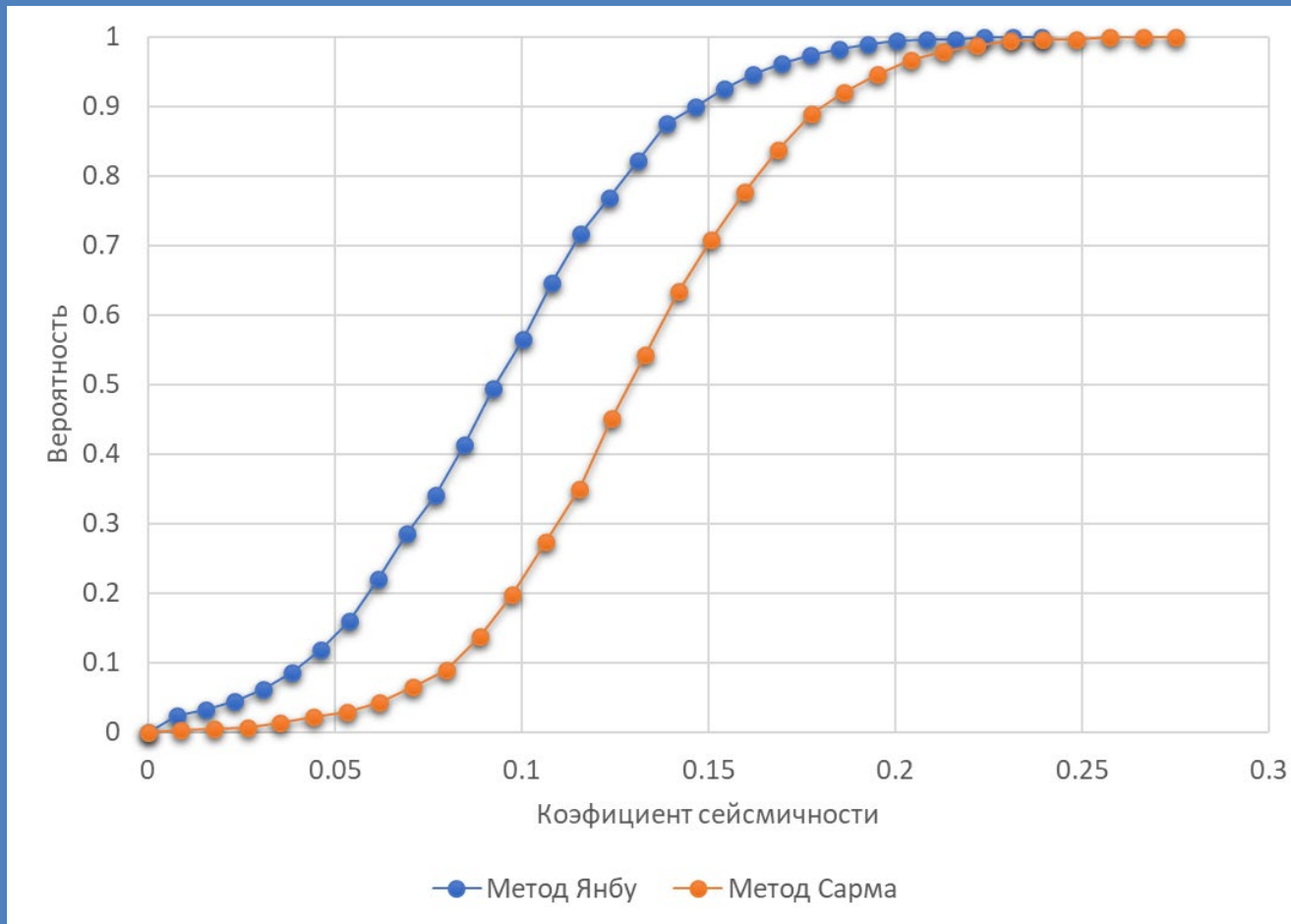


K_u по методу Янбу – 1.255,
по методу Сарма – 1.38. K_u
(Сарма)/ K_u (Янбу) = 1.1

A_0 по методу Янбу – 0.093,
по методу Сарма – 0.13.
 A_0 (Сарма)/ A_0 (Янбу) = 1.4



Влияние метода расчета на величину начального сейсмического ускорения (A_0) при котором склон теряет устойчивость.



Вероятность потери устойчивости при $A_0=0.1$:

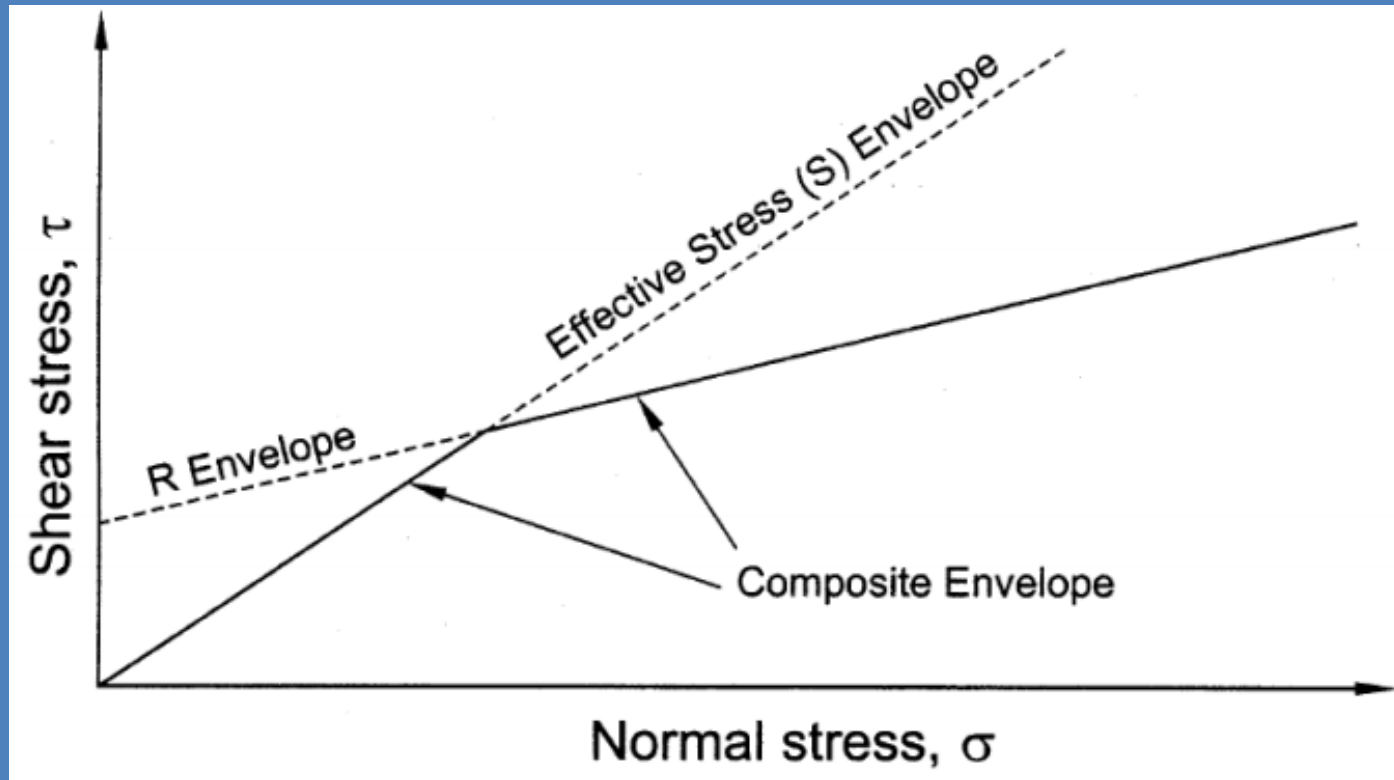
- по методу Янбу – 56%
- по методу Сарма – 20%.

Оценка величины сейсмического коэффициента (приближение 4).

Учет порового давления при сейсмическом воздействии

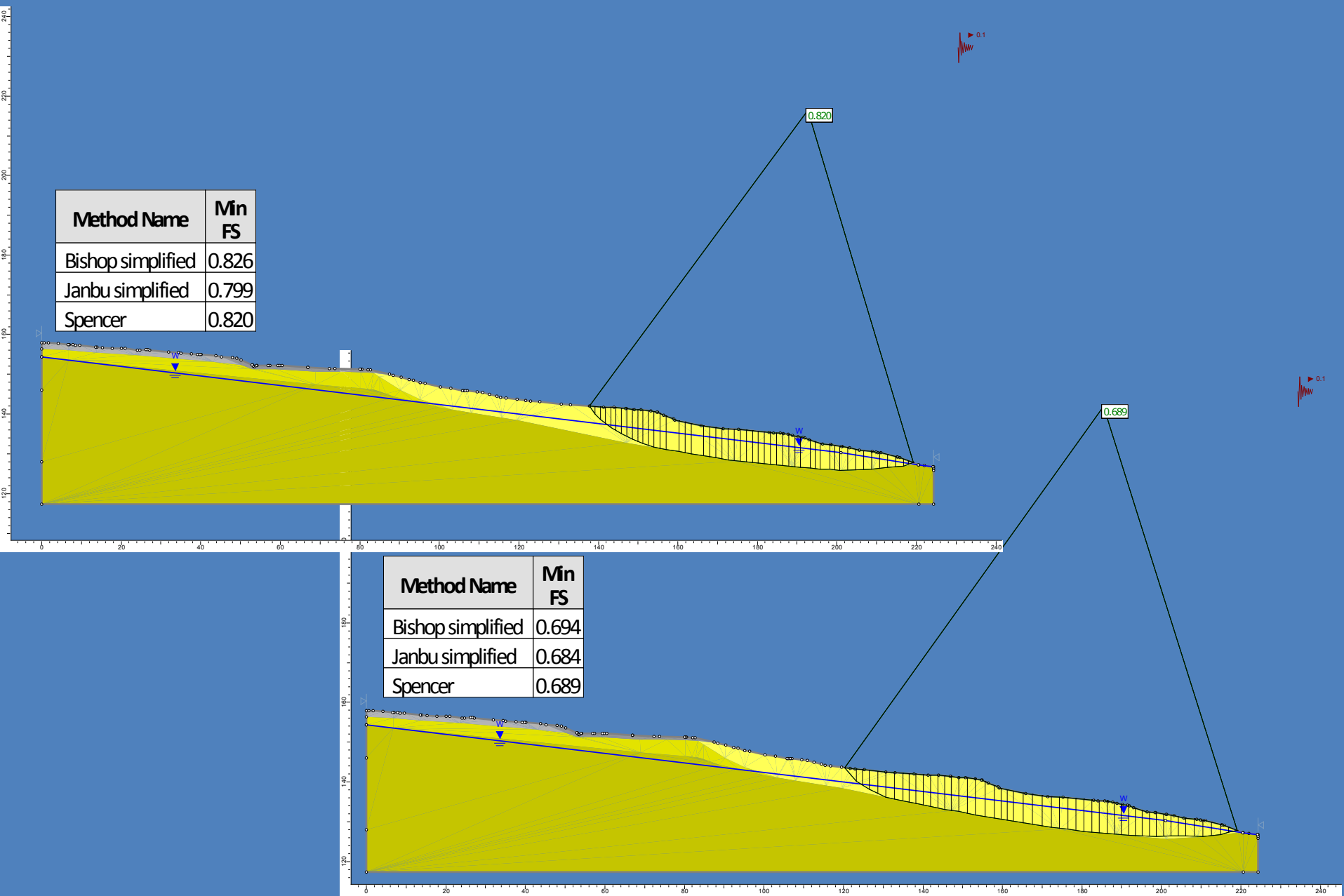
ПОСТАДИЙНЫЙ ПСЕВДОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ. СХЕМА ИНТЕРПОЛЯЦИИ
НЕДРЕНИРУЕМОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Daniel R. VandenBerge, Stephen G. Wright, Improved Undrained Strength Interpolation
Scheme for Rapid Drawdown



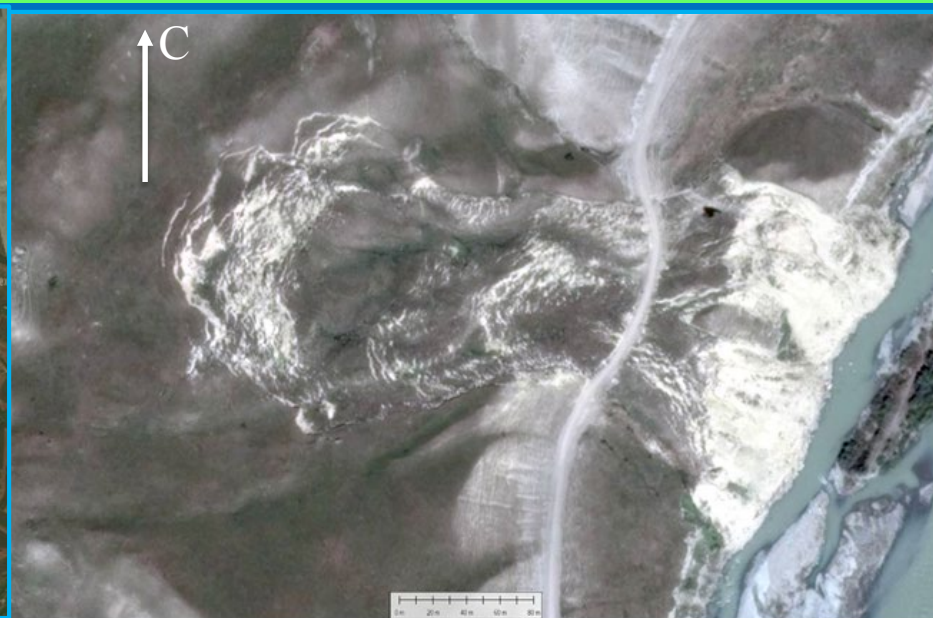
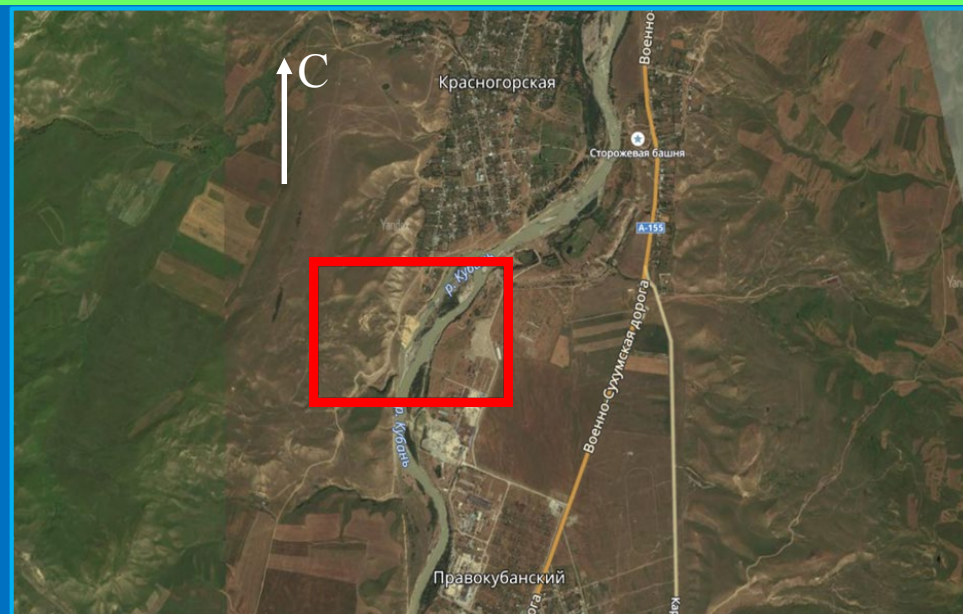
В основе данного подхода лежит билинейный критерий прочности Кулона-Мора

Учет порового давления при сейсмическом воздействии

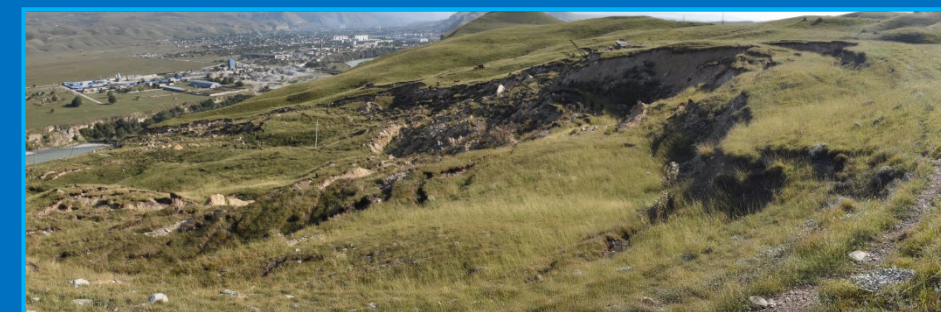


Оценка величины сейсмического коэффициента (приближение 5).

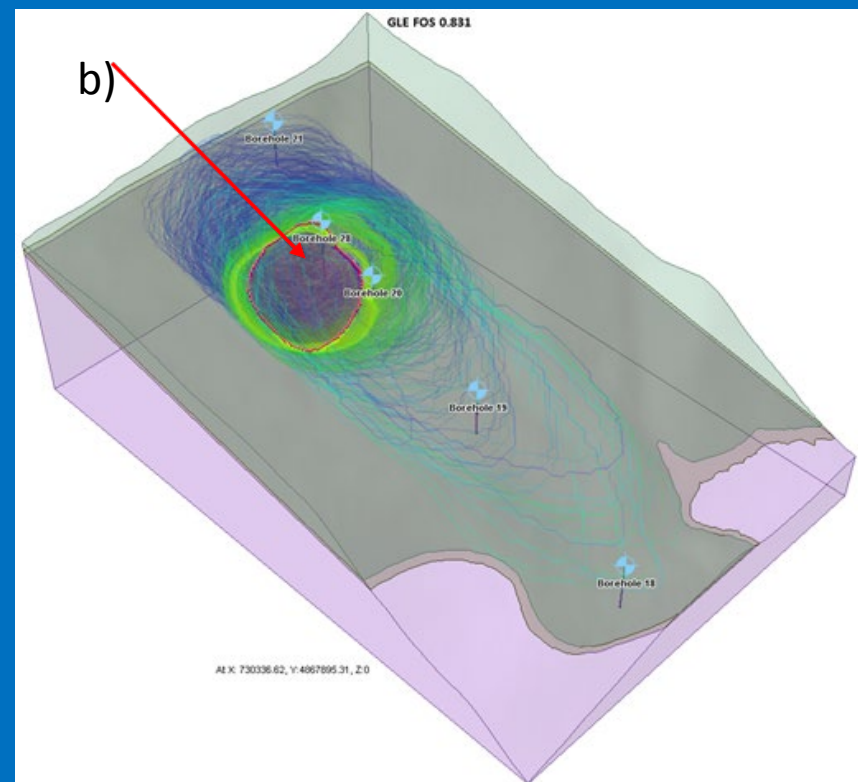
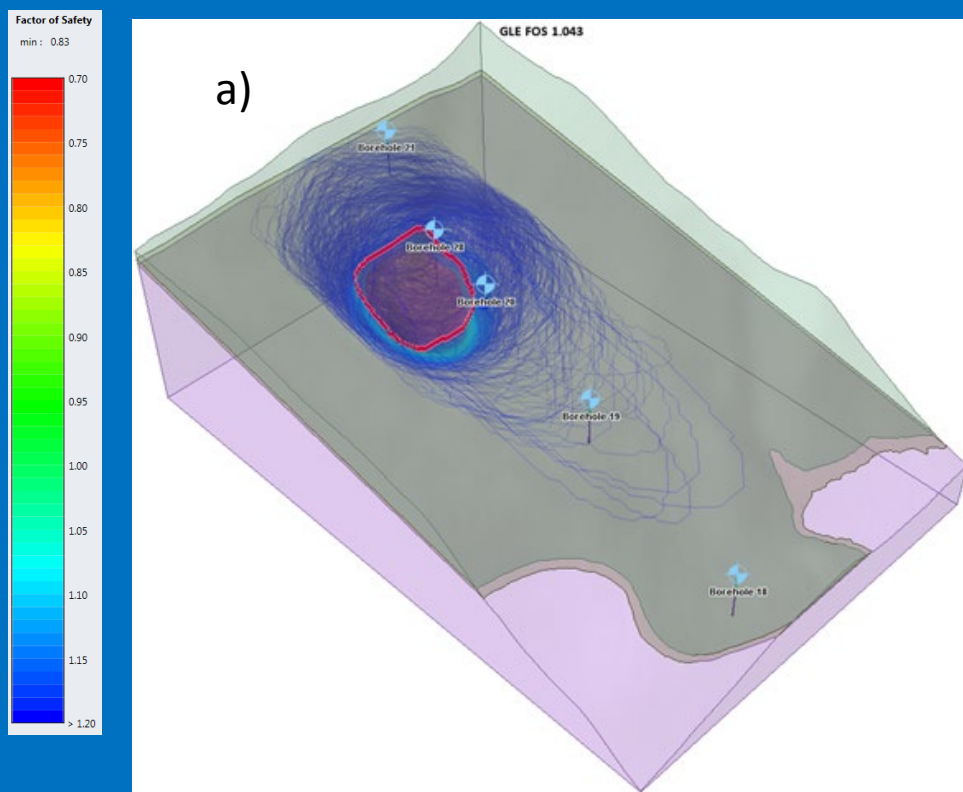
ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА



Расположение исследуемого участка (красный прямоугольник)



ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА



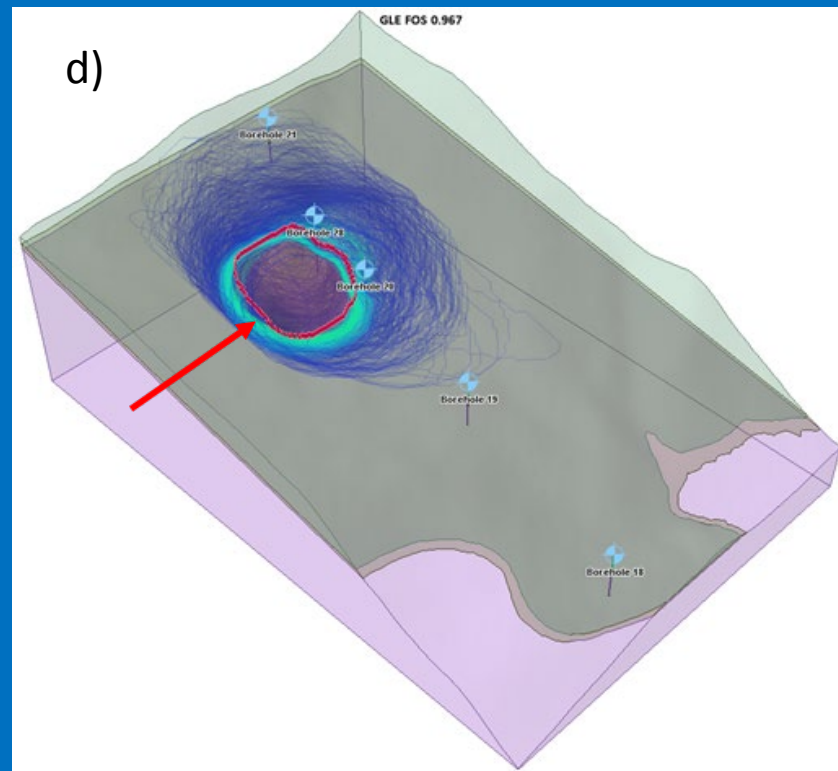
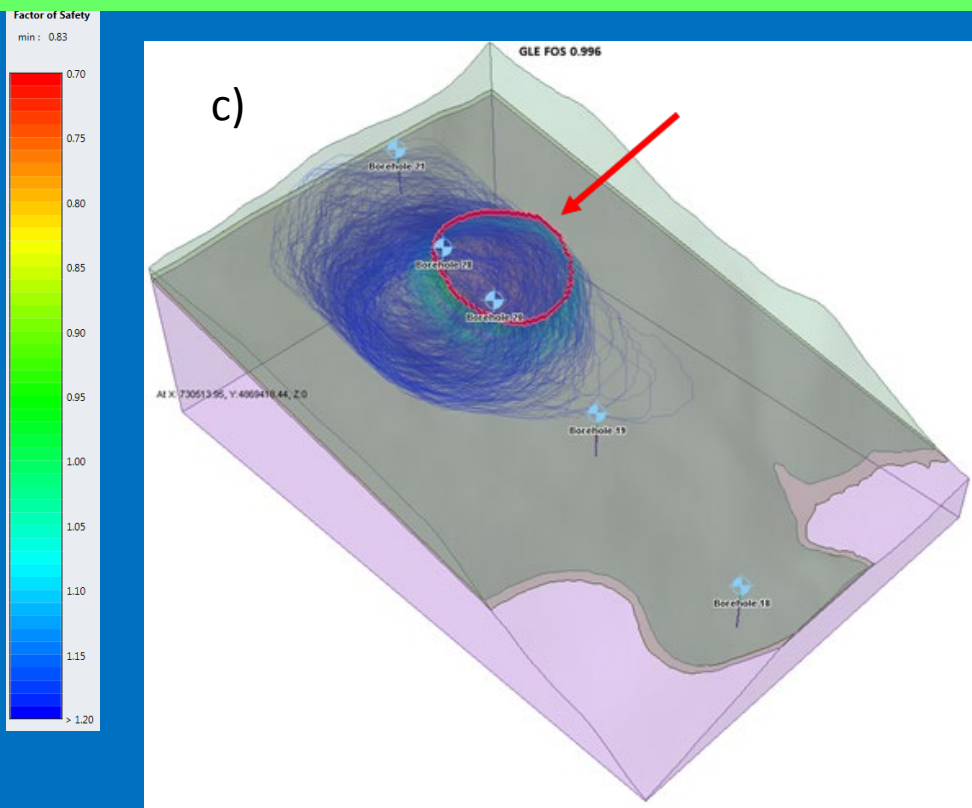
Результаты моделирования устойчивости склона:

а) без учета сейсмического воздействия ($K_u = 1.04$);

б) с сейсмическим воздействием, направленном по падению склона ($K_u = 0.831$);

Красной стрелкой показано направление сейсмического воздействия

ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА



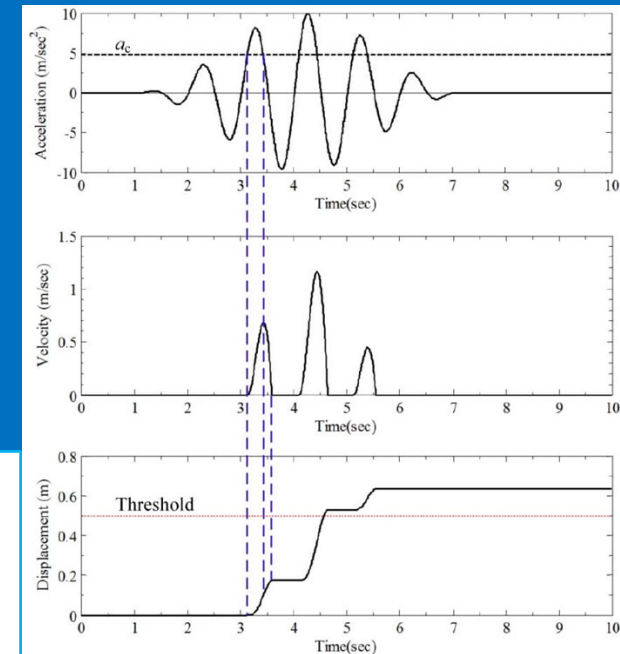
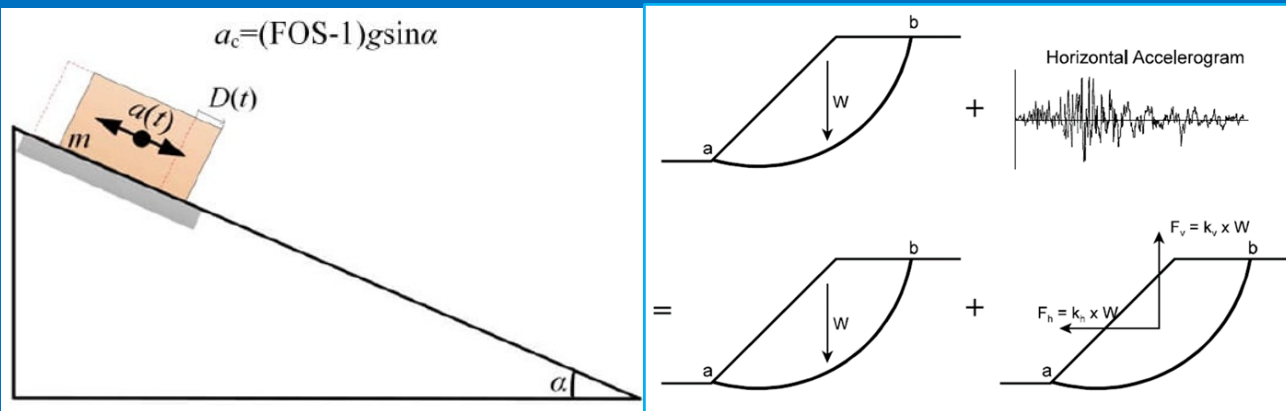
Результаты моделирования устойчивости с сейсмическим воздействием :

- c) направленном с северо-востока на юго-запад (по простиранию склона) ($K_u = 0.967$);
 - d) направленном с юго-запада на северо-восток (по простиранию склона) ($K_u = 0.996$).
- Красной стрелкой показано направление сейсмического воздействия

Сопоставление результатов псевдостатического и динамического анализов

Метод Ньюмарка

Данный подход моделирует оползень как блок, который скользит с трением по наклонной поверхности, при этом учитывается ускорение, которое является следствием произошедшего землетрясения. Смещение оползня при этом сейсмогенном воздействии может быть оценено, если дважды проинтегрировать по времени ускорение, которое превышает пороговое ускорение, требуемое для преодоления трения покоя и начала движения.

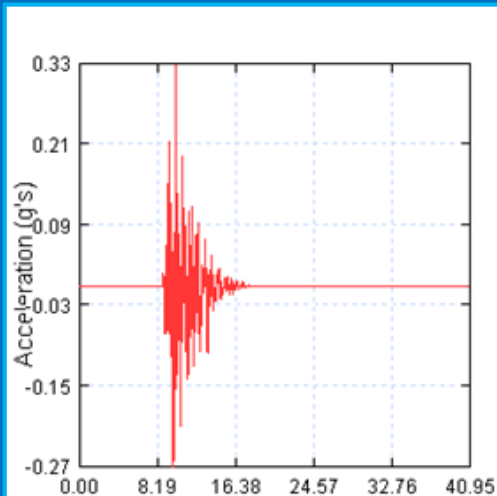


Проведение анализа по методу Ньюмарка требует определения двух ключевых элементов:

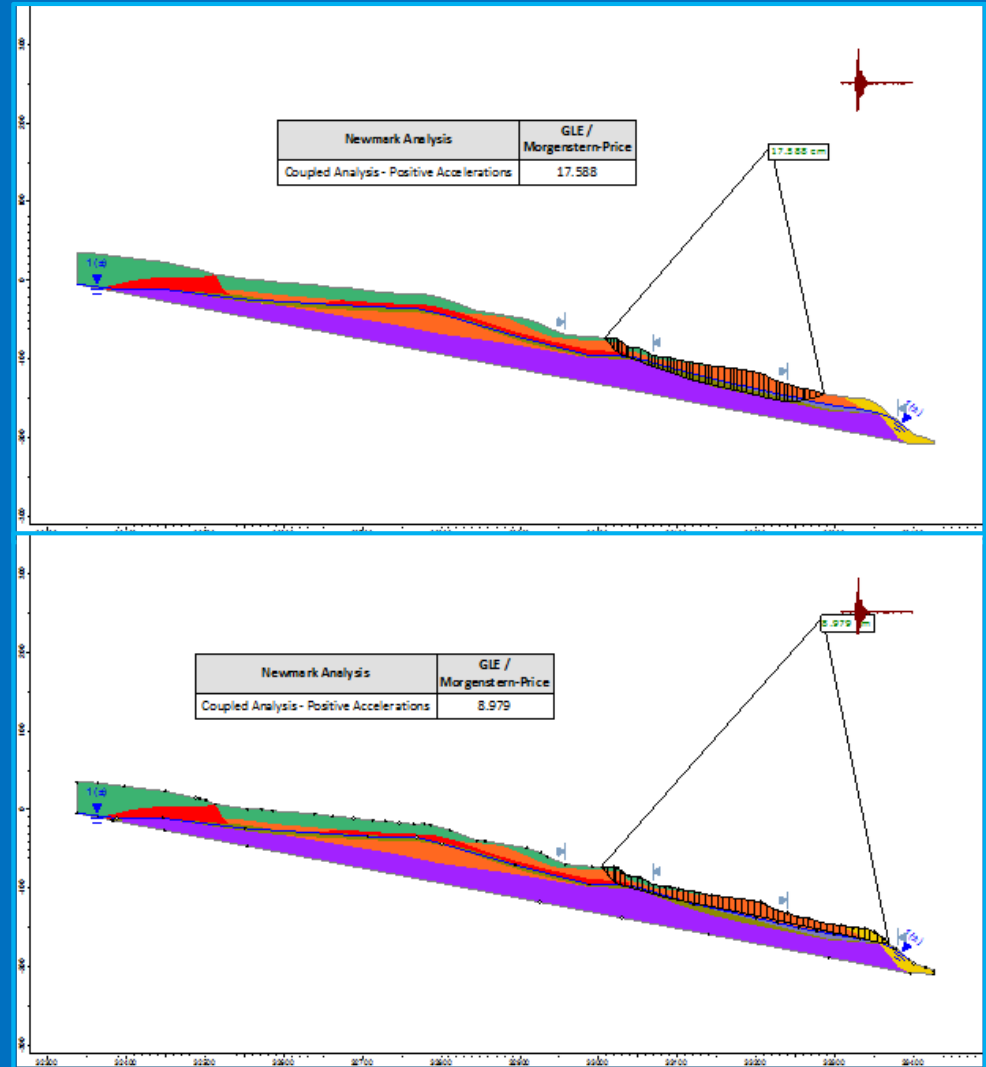
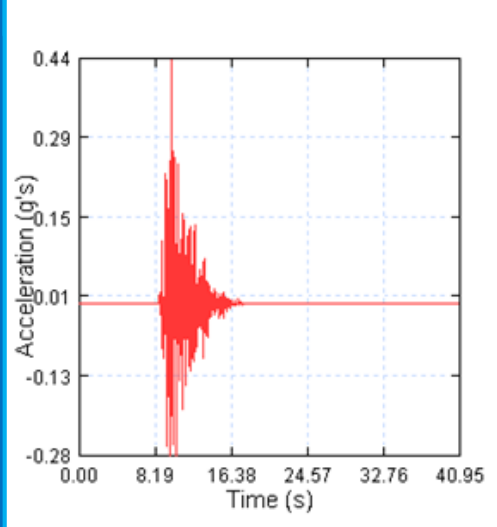
- 1) динамической устойчивости склона, определяемой количественно как критическое, пороговое (a_c) ускорение основания, необходимое для преодоления силы трения покоя и начала движения
- 2) силы воздействия землетрясения, которому система подвергается.

Сопоставление результатов псевдостатического и динамического анализов

№1



№2

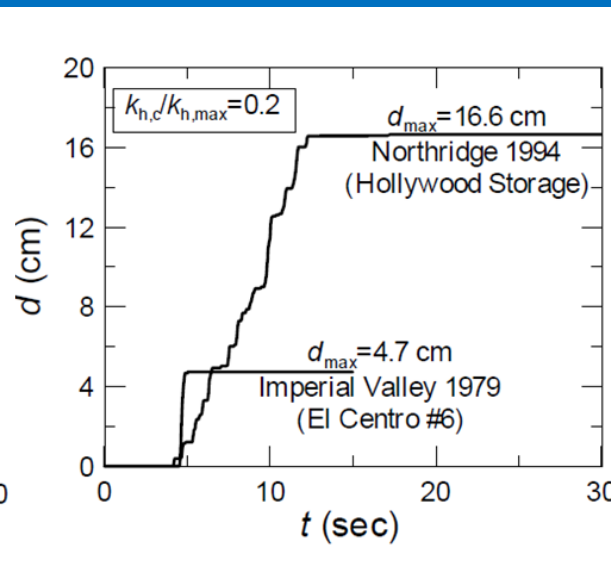
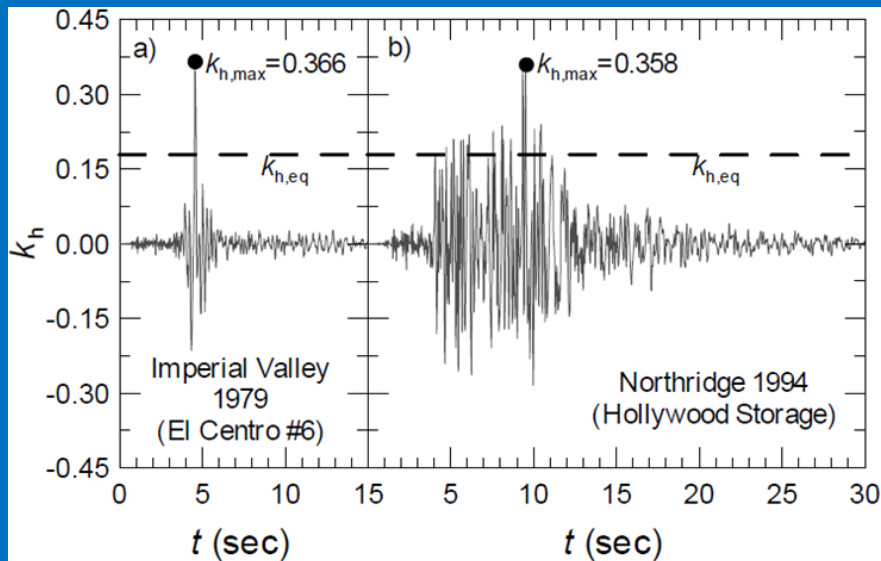


Модельные акселерограммы рассчитанные на свободной поверхности оползня (верхняя №1, максимальное пиковое ускорение 0.33g, нижняя №2, максимальное пиковое ускорение 0.44g).

Динамический анализ

Сопоставление результатов псевдостатического и динамического анализов

Результаты, аналогичные приведенным выше, описаны в работе «PERFORMANCE-BASED PSEUDO-STATIC ANALYSIS OF SLOPES» *Giovanni Biondi, Ernesto Cascone, Sebastiano Rampello*



$$k_{h,max} = a_{max}/g$$

$$k_{h,eq} = 0.5 \cdot k_{h,max}$$

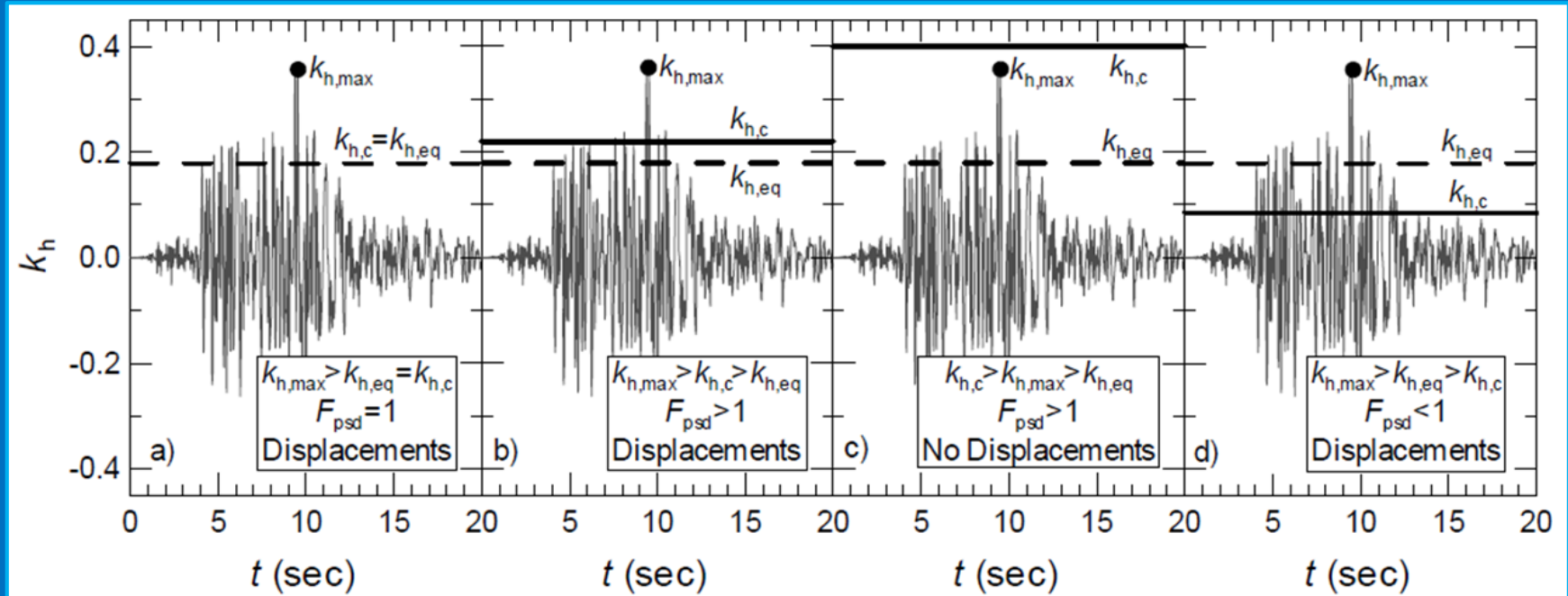
Как минимум, при сопоставлении результатов псевдостатического анализа с результатами, полученными по методу Ньюмарка, необходимо оперировать тремя величинами ускорений:

1. пиковым горизонтальным ускорением $k_{h,max}$,
2. начальным ускорением смещения $k_{h,eq}$
3. расчетной (пороговой) величиной ускорения, при которой склон теряет устойчивость - $k_{h,c}$.

Динамический анализ

Сопоставление результатов псевдостатического и динамического анализов

При таком подходе, возможны 4 случая соотношения ускорений



Ку склона при расчете методом Ньюмарка может быть определён как:

$$K_y = A * k_{h,c} / k_{h,max}$$

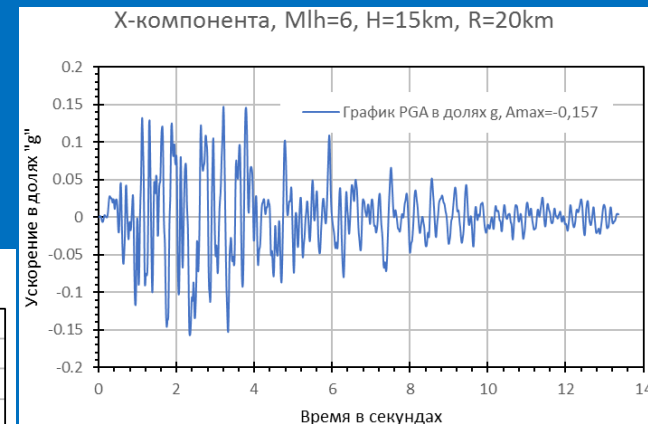
При таком подходе, оценка влияния сейсмического воздействия может быть оценена следующим образом: количество пиковых значений ускорений больше начального ускорения смещения $k_{h,eq}$ (N) умноженное на $K = k_h / k_{h,eq}$

Динамический анализ

ВЛИЯНИЕ УДАЛЕННОСТИ ЭПИЦЕНТРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Для оценки влияния удаленности эпицентра землетрясения на устойчивость оползневого склона, были использованы обобщенные синтезированные акселерограммы со следующими параметрами:

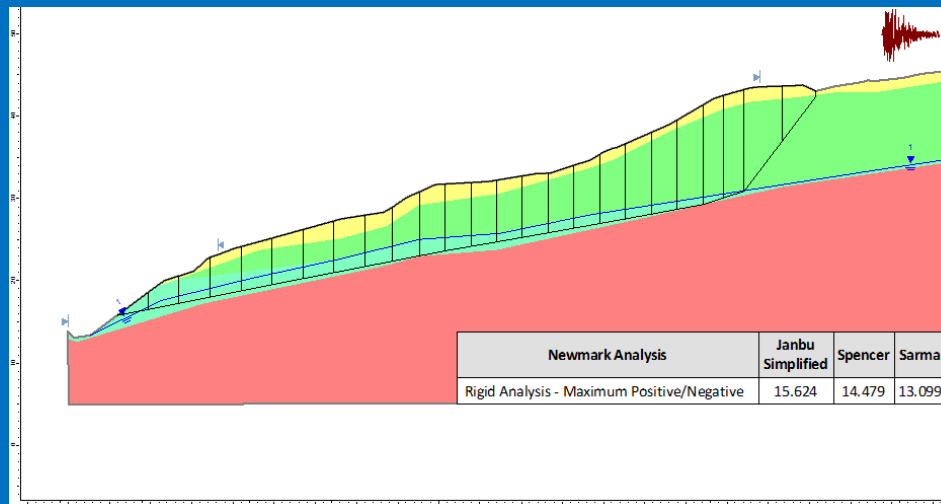
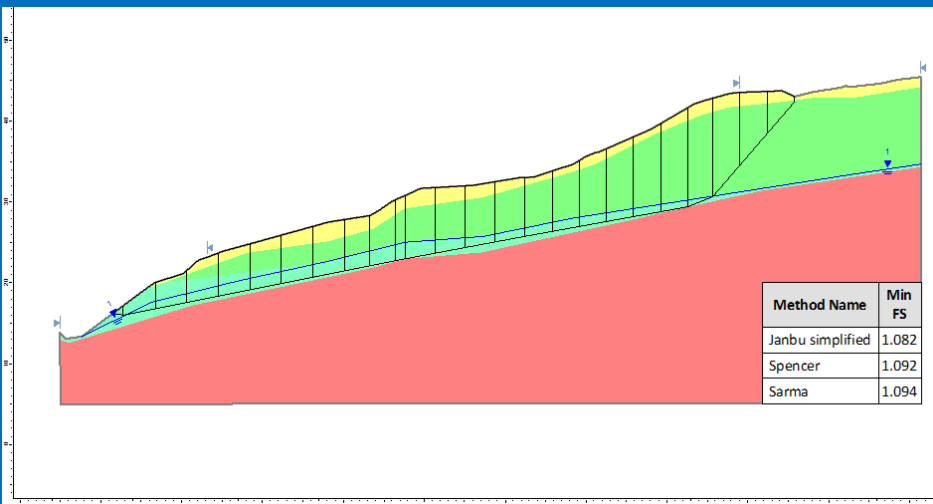
- ✓ Параметры очага землетрясения: $M_l H=6$, глубина гипоцентра $H=15$ км, механизм сбросо-сдвиг.
- ✓ Категория грунта по сейсмическим свойствам – II.
- ✓ Эпицентральные расстояния 10, 20 и 30 км.



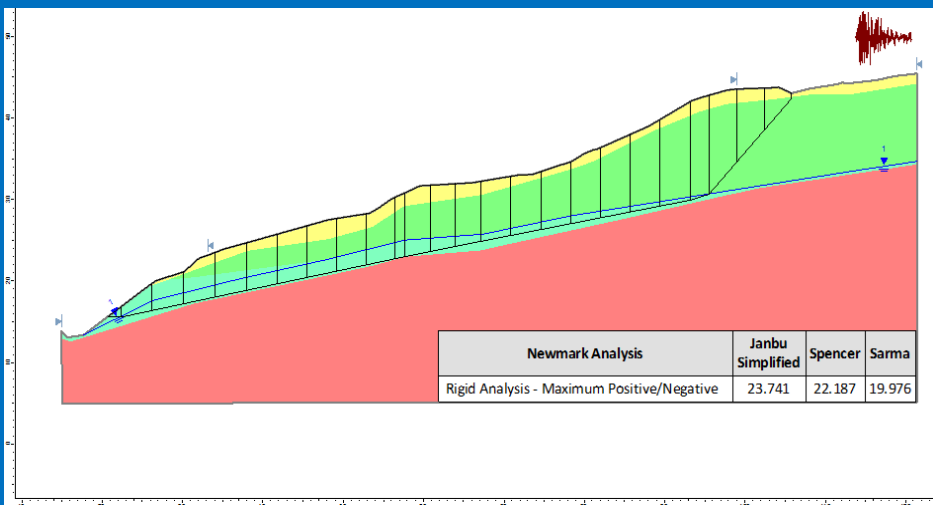
ВЛИЯНИЕ УДАЛЕННОСТИ ЭПИЦЕНТРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Стат. условия

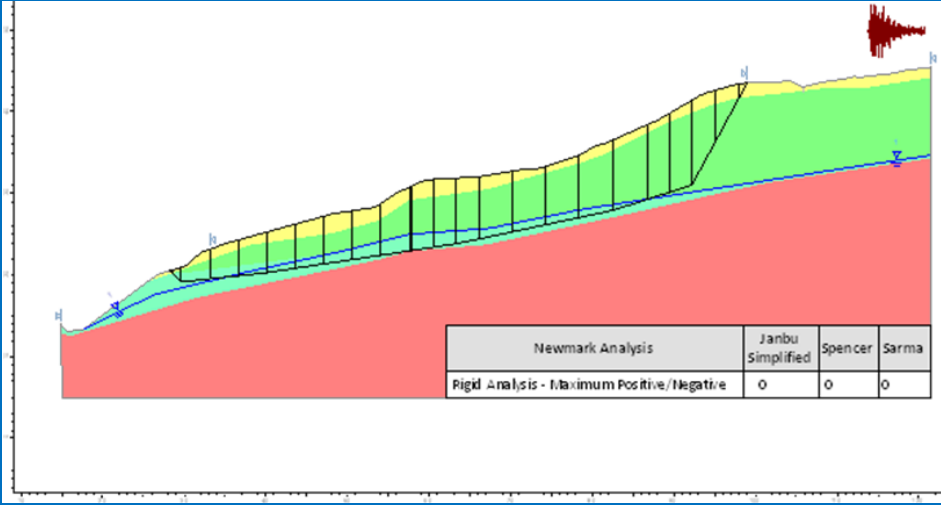
20 км



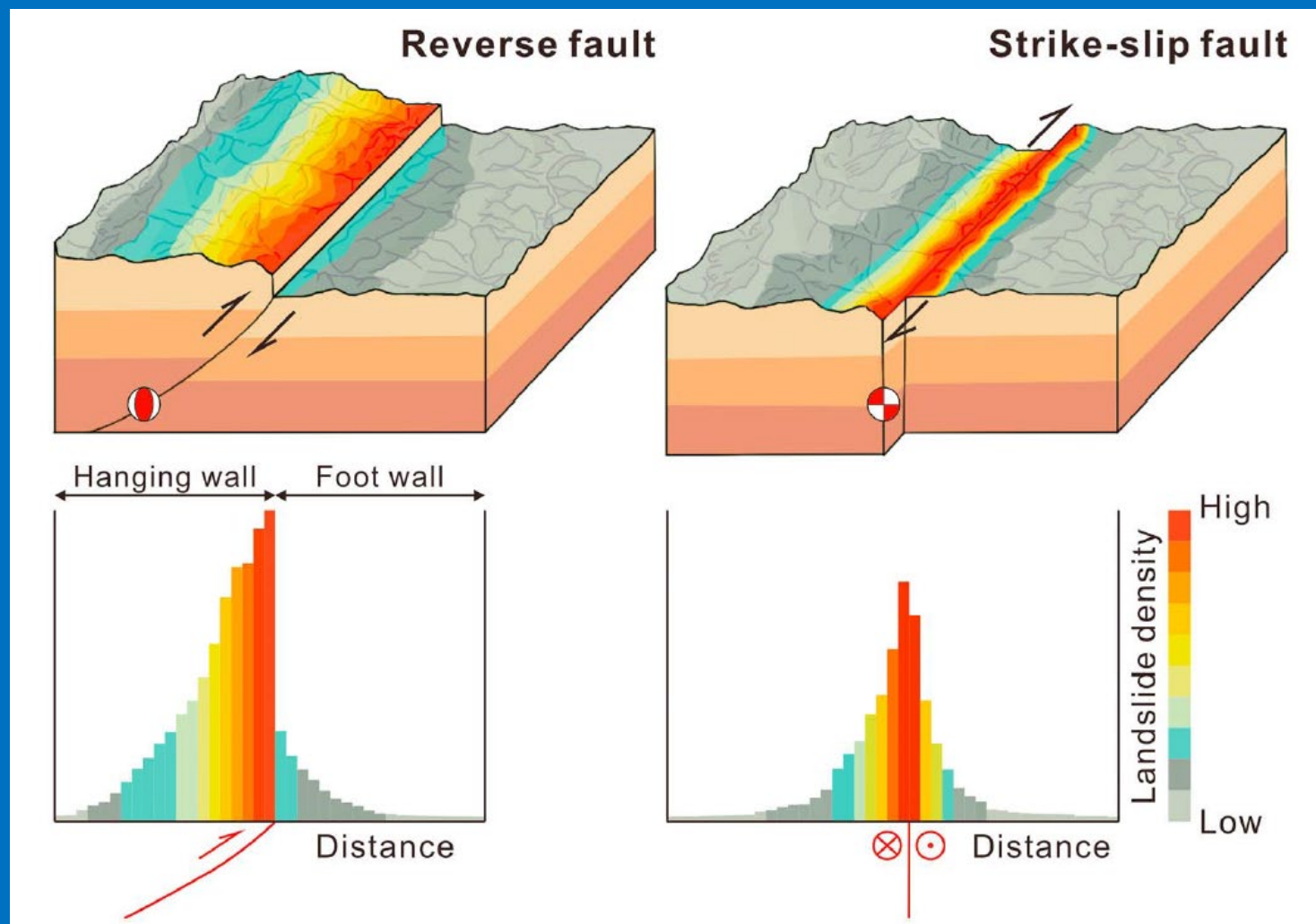
10 км



30 км



ВЛИЯНИЕ ТИПА СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩЕГО РАЗЛОМА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОПОЛЗНЕЙ



Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts

Xuanmei Fan¹, Gianvito Scaringi et al.

**БЛАГОДАРИМ ЗА
ВНИМАНИЕ**

