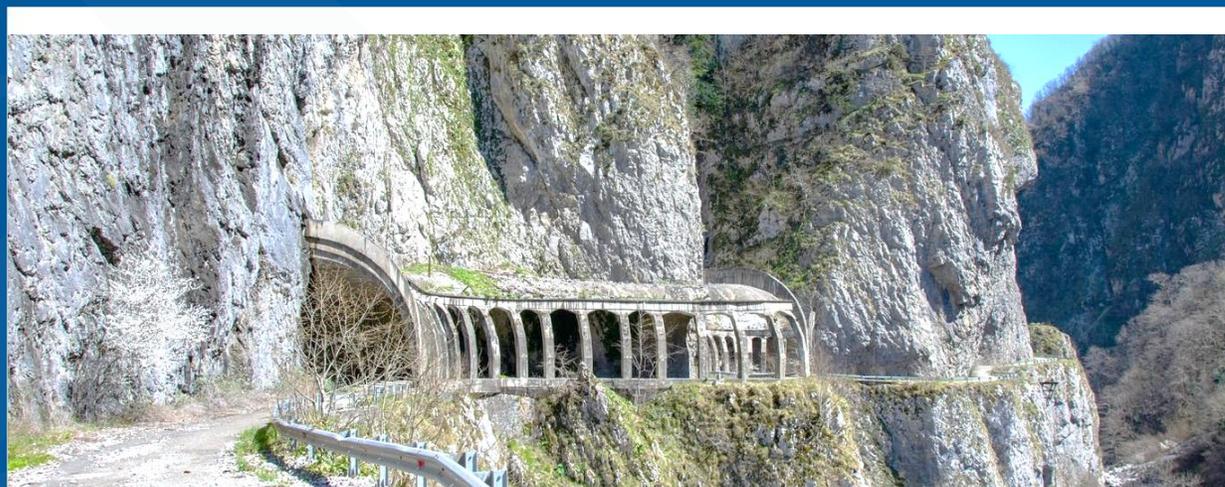




# МГРИ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ



## ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ СКЛОНА НА РАСЧЁТНЫЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ КАМНЕЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ УЛАВЛИВАЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ

Аспирант:

Лентюков Савелий Николаевич

Научный руководитель:

д.г.-м.н., профессор Фоменко Игорь Константинович

# Проектирование улавливающих сооружений



Активное хозяйственное освоение горных районов страны предполагает строительство новых и реконструкцию существующих объектов, располагающихся в зоне распространения опасных геологических процессов.

В этом случае возникает необходимость инженерной защиты территорий, зданий и сооружений с учётом оценки риска опасных геологических процессов.



Противообвальная галерея в ущелье Ацху

(<https://moto.tours/>)

# Проектирование улавливающих сооружений



Характерными опасными геологическими процессами являются гравитационные склоновые, представленные обвалами и камнепадами.

Камнепады – быстрое, нисходящее, периодическое движение обломков скальных грунтов, характеризующееся внезапностью и включающее свободное падение, вращение, скольжение, подпрыгивание и дробление.



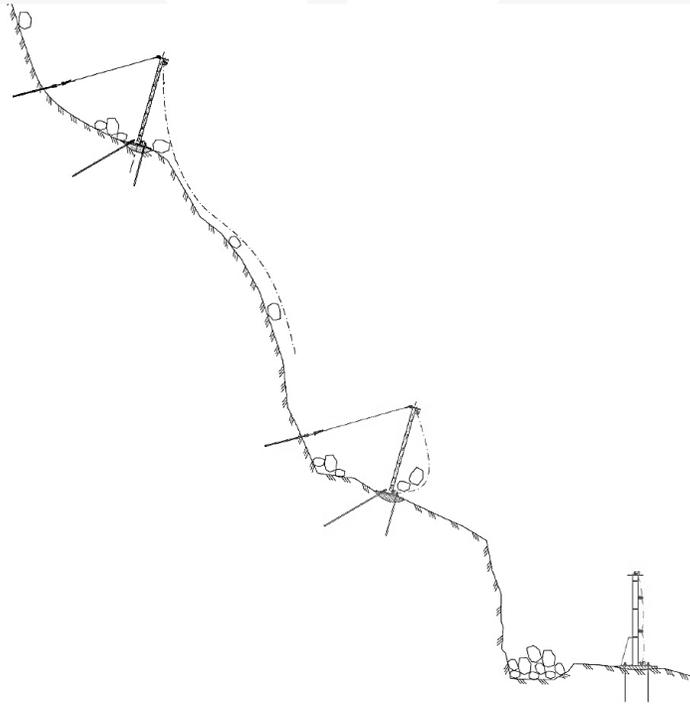
Камнепад в п.г.т. Гурзуф (Республика Крым)

(3 марта 2018, РИА Новости Крым (<https://crimea.ria.ru/>), Н. Хлевицкий)

# Проектирование улавливающих сооружений

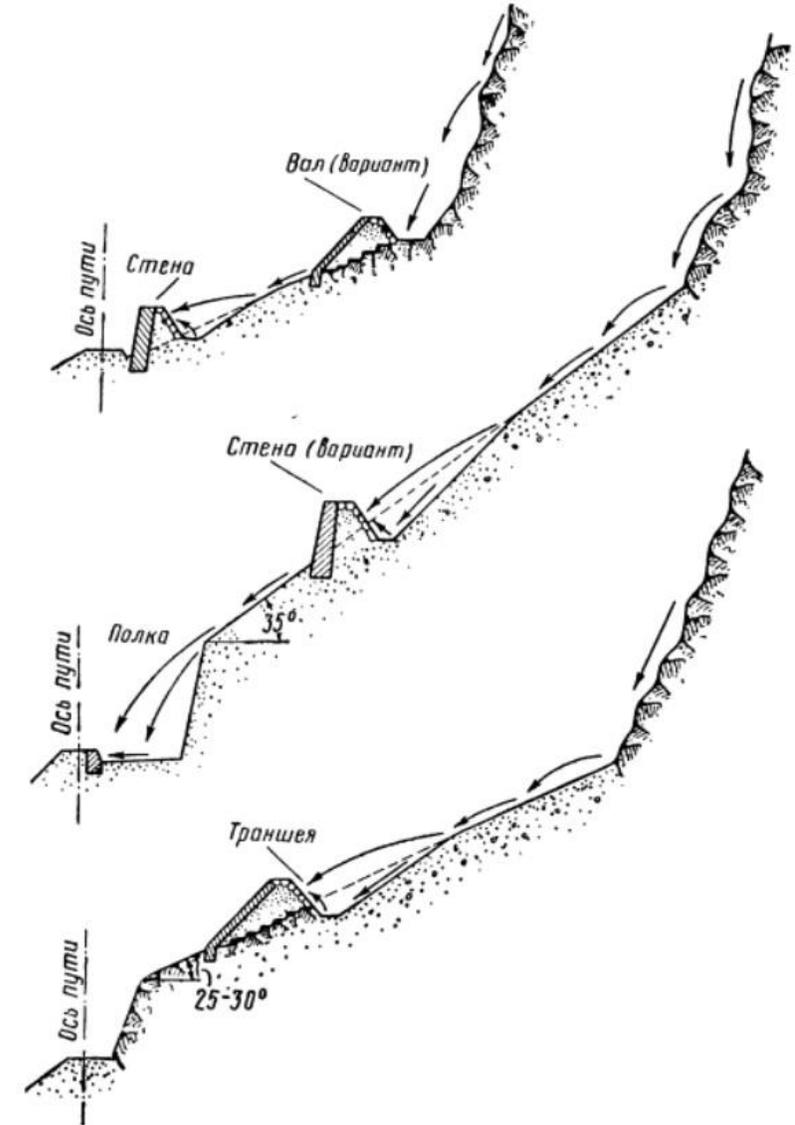


К распространенным средствам противообвальной (противокампанной) защиты относят возведение массивных (гравитационных) и гибких улавливающих сооружений.



Проектирование улавливающих сооружений включает в себя определение их расположения и габаритных размеров, а также расчёт на прочность и устойчивость.

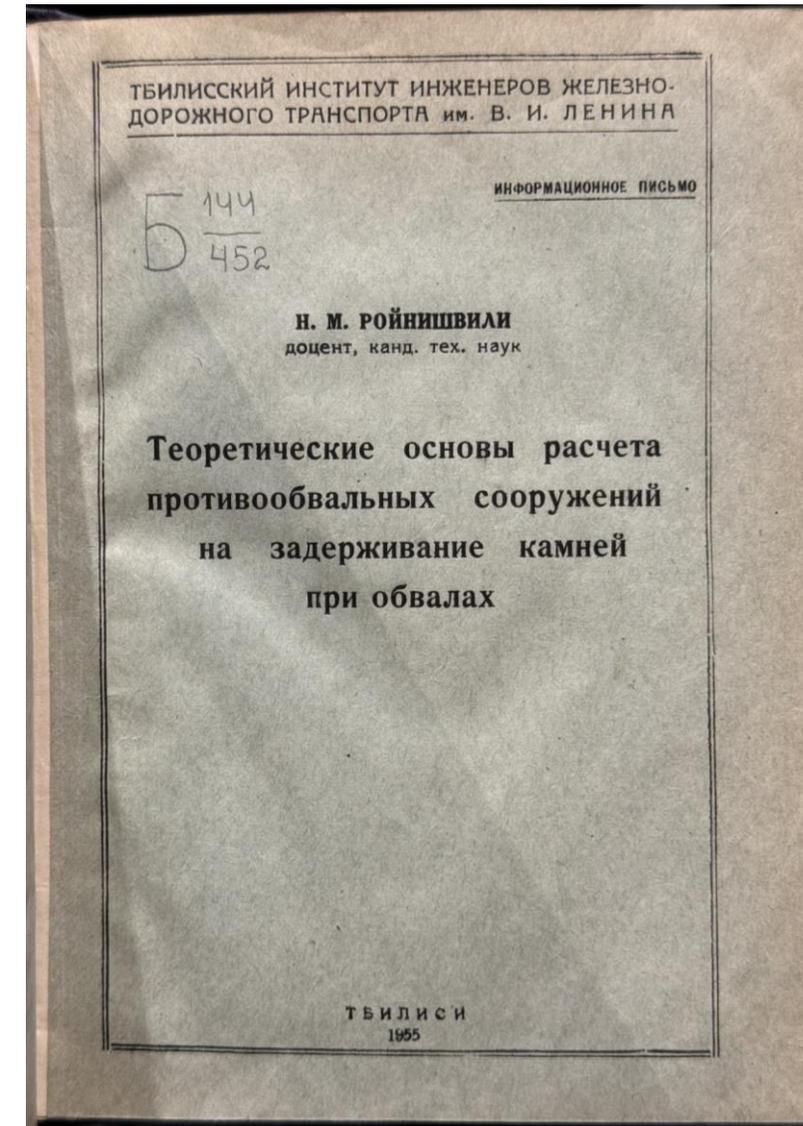
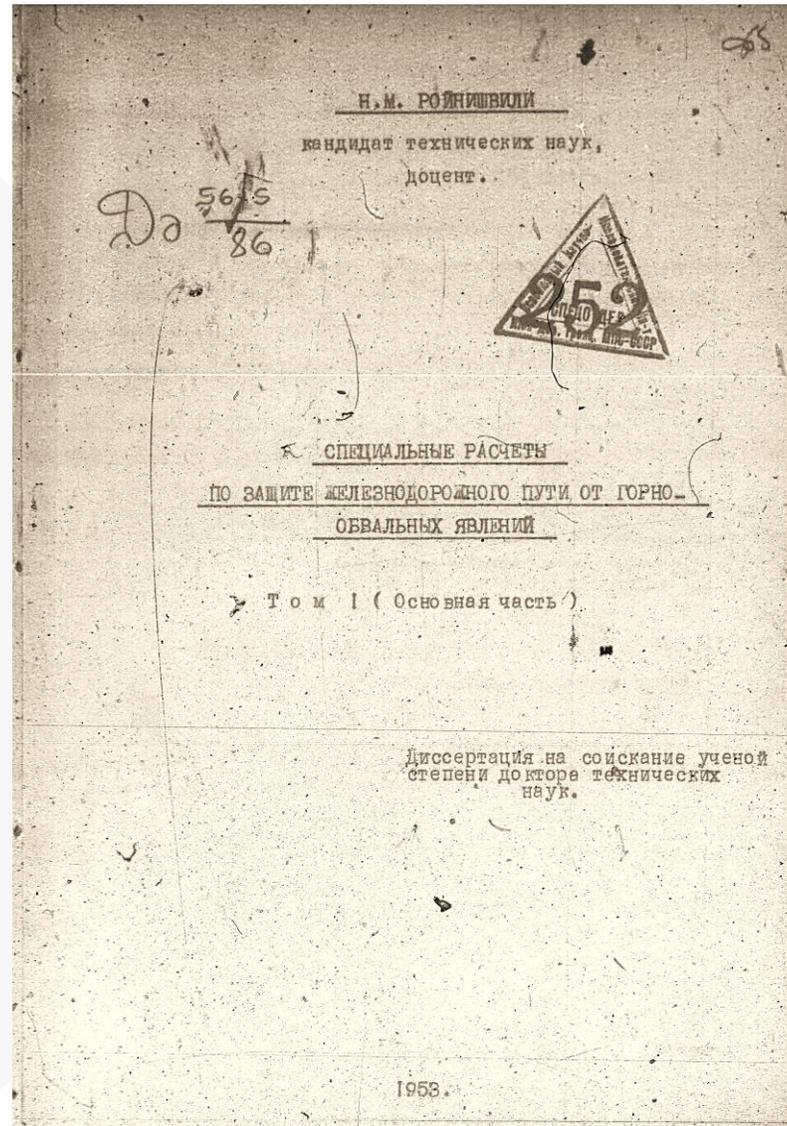
Расположение и габаритные размеры улавливающих сооружений являются основными параметрами и определяются путём выполнения расчётов на перелёт и на выкатывание (подскакивание).



# Аналитический метод расчёта



Расчёты на перелёт и на выскакивание (подскакивание) в настоящее время выполняются в соответствии с аналитическим методом, основанным на эмпирических зависимостях, полученных Николаем Миновичем Ройнишвили в ходе экспериментальных и теоретических исследований, результаты которых были опубликованы в 1953 и 1955 годах.



# Аналитический метод расчёта



В монографиях, изданных Николаем Миновичем Ройнишвили в 1960 и в 1973 годах, представление аналитического метода расчёта, было дополнено описанием опыта практического применения и примерами расчётов противообвальных сооружений.



# Аналитический метод расчёта



В методических рекомендациях 1973 года и в руководстве 1984 года, а также в используемых в настоящее время Рекомендациях по проектированию и расчёту противообвальных сооружений на автомобильных дорогах 2017 года (ОДМ 218.2.051-2015), аналитический метод расчёта, предложенный Николаем Миновичем Ройнишвили, приведён практически без изменений.

## ЦНИИС МИНТРАНССТРОЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПРОТИВООБВАЛЬНЫХ  
И ПРОТИВОЛАВИННЫХ ГАЛЕРЕЙ И ЭСТАКАД  
ДЛЯ ПРОПУСКА СКАЛЬНЫХ ОБВАЛОВ В  
РАЙОНАХ СЕВЕРНОЙ СТРОИТЕЛЬНО-  
КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Москва 1972

МИНТРАНССТРОЙ  
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Утверждаю.  
Зам. директора института  
Н. Б. СОКОЛОВ  
16 мая 1983 г.

## РУКОВОДСТВО ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПРОТИВООПАЗНЕВЫХ И ПРОТИВООБВАЛЬНЫХ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТИВООБВАЛЬНЫХ  
ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Одобрено  
Главным техническим управлением Минтрансстрой

МОСКВА 1984

ОДМ 218.2.051-2015

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ



РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И РАСЧЕТУ  
ПРОТИВООБВАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ  
НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО  
(РОСАВТОДОР)

Москва 2017

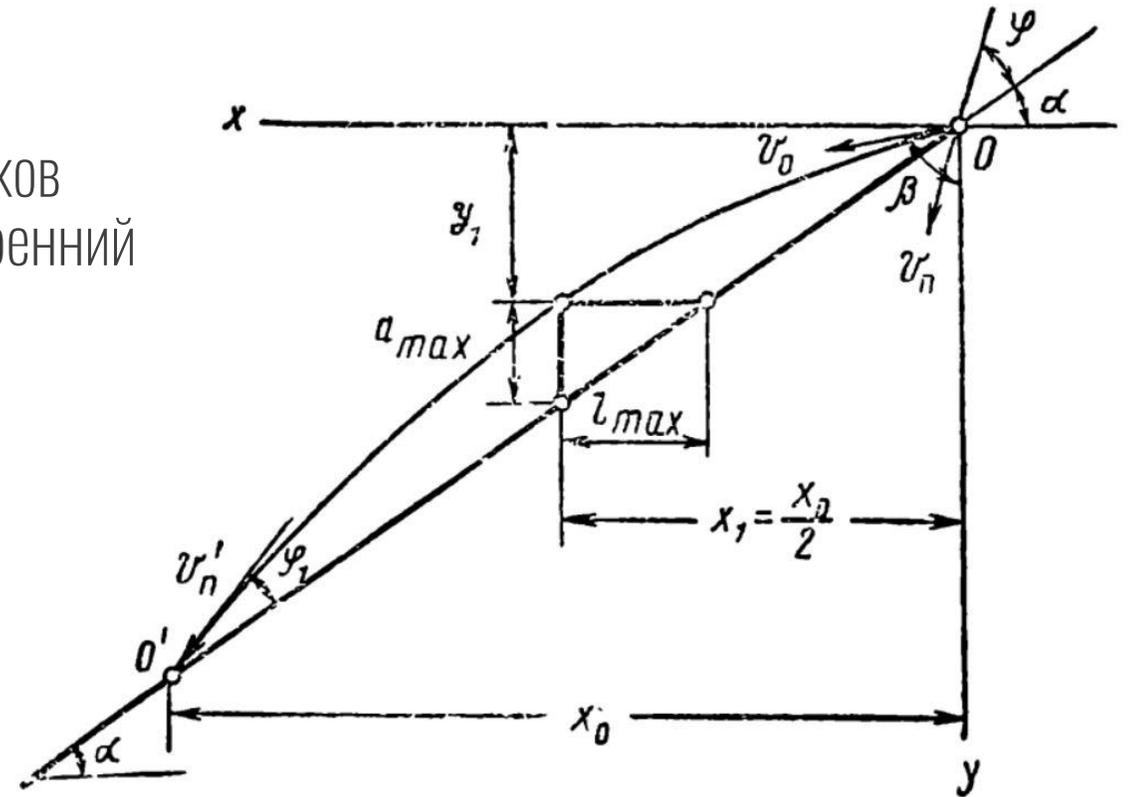
# Аналитический метод расчёта



Сущность аналитического метода расчёта на перелёт и на выкатывание (подскакивание), выполняемого для определения расположения и габаритных размеров улавливающего сооружения, заключается в последовательном определении:

- расчётных скоростей движения обломков горных пород;
- уравнения расчётной траектории движения обломков горных пород;

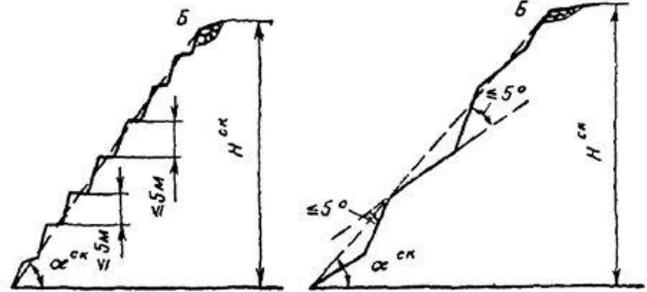
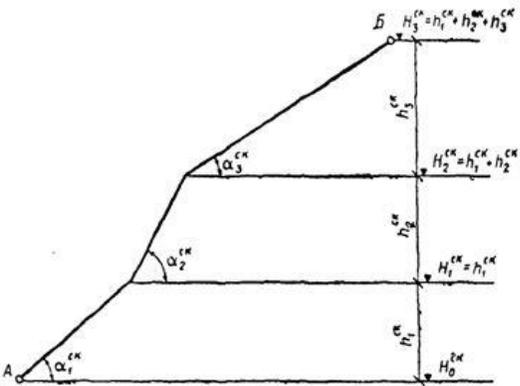
- характерных геометрических элементов последнего скачка обломков горных пород;
- высоты набега (выкатывания) и подскакивания обломков горных пород на внутренний откос улавливающего сооружения.



# Аналитический метод расчёта



Расчётные скорости движения обломков горных пород зависят от геометрии поперечного профиля склона, который относят к одному из четырёх идеализированных типов, и в общем случае определяются высотой склона, углом крутизны склона и безразмерным коэффициентом  $\varepsilon$ , зависящим только от угла крутизны склона.

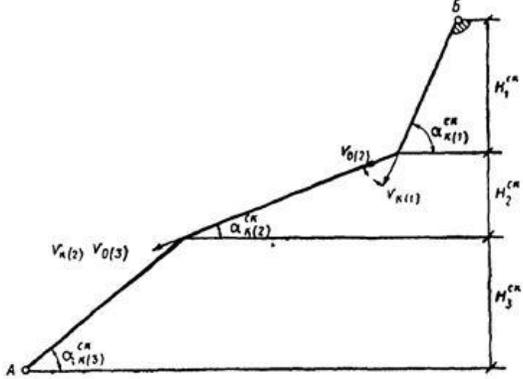
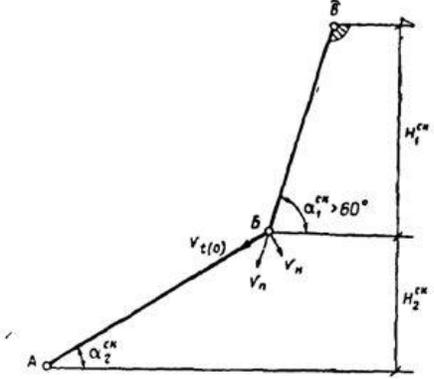
Тип склона	Расчётная скорость движения камней
 <p data-bbox="1182 725 1406 773">Тип I (Ia, Ib)</p>	$v_p = \varepsilon \sqrt{H}$
 <p data-bbox="1233 1253 1355 1296">Тип II</p>	$v_p = \sum_{i=1}^{i=X} \varepsilon_i \left( \sqrt{H_i} - \sqrt{H_{i-1}} \right)$

# Аналитический метод расчёта



Расчётная траектория движения камней и соответствующие ей характерные геометрические элементы определяются в зависимости от расчётной скорости движения камней, угла крутизны склона и угла отражения камней от склона.

Наибольшая возможная высота набега камней на встречный откос улавливающей пазухи определяется в соответствии с углом падения камней на дно сооружения и в зависимости от коэффициентов восстановления  $\rho$  и мгновенного трения  $\lambda$ .

Тип склона	Расчётная скорость движения камней
 <p style="text-align: center;"><b>Тип III</b></p>	$v_{p(i)} = \sqrt{v_{0(i)}^2 + 2gH_i(1 - K_i \operatorname{ctg} \alpha_i)}$
 <p style="text-align: center;"><b>Тип IV</b></p>	$v_p = \sqrt{v_{t(0)}^2 + \varepsilon_2^2 H_2}$ $v_{t(0)} = (1 - \lambda) v_{\Pi} \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$ $v_{\Pi} = \varepsilon_1 \sqrt{H_1}$



К сожалению, предложенный Н.М. Ройнишвили аналитический метод расчёта, содержит ряд допущений, снижающих точность определения места расположения и габаритных размеров улавливающих сооружений:

- расчётные траектории движения камней определяются только на последнем участке движения вблизи сооружения, а расчётные траектории движения камней выше по склону, от места вывала до расположения сооружения, не рассматриваются из-за сложности построения таких траекторий;
- при определении расчётной скорости движения камней используется идеализированные поперечные профили склонов, не учитывающие микрорельеф;
- в коэффициенте  $\varepsilon$ , определяемом только в зависимости от углы крутизны склона, в связи со сложностью определения экспериментальным путём и невозможностью теоретического определения, был скрыт коэффициент  $k$ , учитывающий комплексное влияние на скорость движения камней группы факторов, в отдельности не поддающихся учёту (размер и форма камня, микрорельеф горного склона, физико-механические свойства грунтов поверхностного покрова, вращательное движение, воздушное сопротивление и т.д.);

# Допущения, снижающие точность аналитического метода

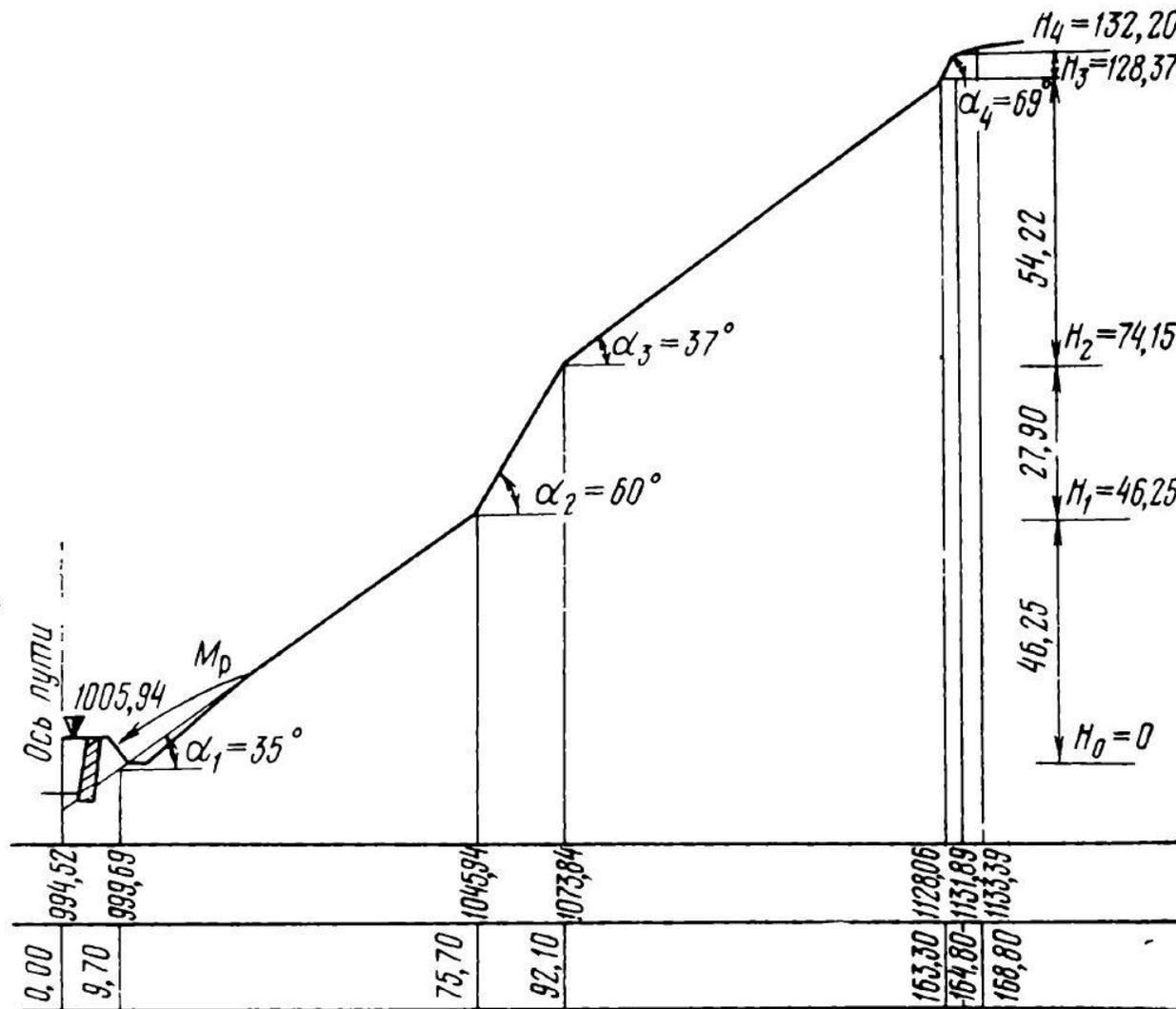


- определение коэффициента  $k$  сводится к представлению его как функции от угла крутизны склона и принятого % обеспечения;
- коэффициент восстановления  $\rho$  и коэффициент мгновенного трения  $\lambda$  не учитываются при определении расчётной скорости движения и расчётных траекторий движения камней (за исключением случая, когда коэффициент мгновенного трения  $\lambda$  учитывается при определении тангенциальной составляющей скорости движения в точке отражения в IV типе склонов).

# Пример расчётного поперечного профиля склона



Для демонстрации влияния микрорельефа склона на расчётные траектории движения камней и результаты определения габаритных размеров улавливающего сооружения был взят пример, рассмотренный Ройнишвили Н.М. в работах, изданных в 1960 и 1973 годах.



# Поверочный расчет в двухмерной постановке



Поверочный расчёт был выполнен в программе RocFall2, разработанной компанией Rocscience и реализующей модель материальной точки, стереомеханическую модель удара и вероятностные методы моделирования (Latin Hypercube, Monte Carlo).

Результаты проведённого поверочного расчёта продемонстрировали высокую сходимость с результатами расчётов, выполненных аналитическим методом.

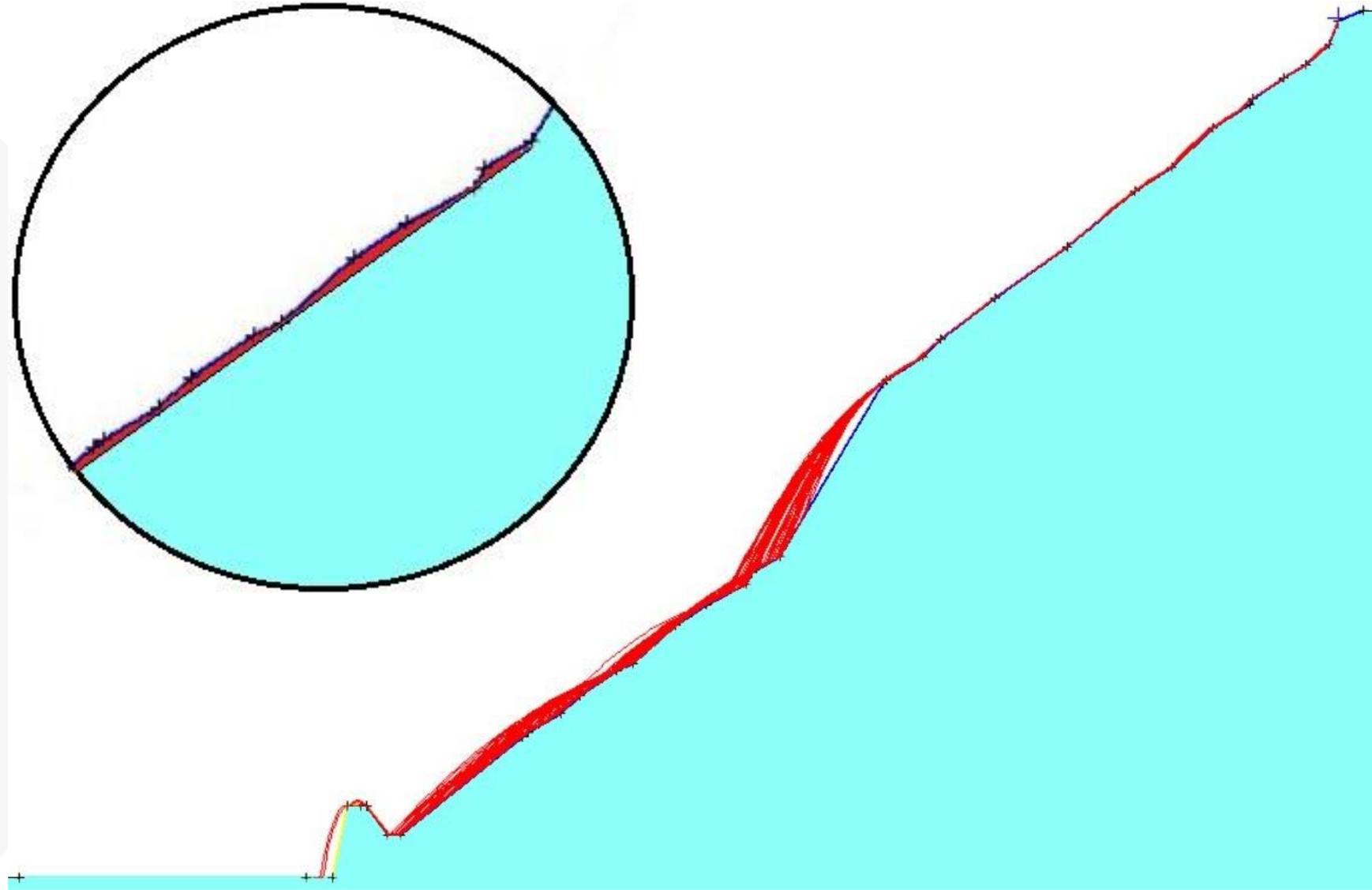
Для случая, описанного в примере и характеризующегося идеальной геометрией поперечного профиля склона (отсутствием микрорельефа), принятые габаритные размеры улавливающего сооружения достаточны для улавливания камней и защищают объект как от перелёта, так и от выкатывания (подскакивания) камней.



# Влияние микрорельефа на траектории движения камней



Но если в первоначальную геометрию поперечного склона внести некоторые дефекты, имитирующие микрорельеф, то принятых габаритных размеров улавливающего сооружения становится недостаточно для улавливания камней, набегаящих на встречный откос улавливающего сооружения.

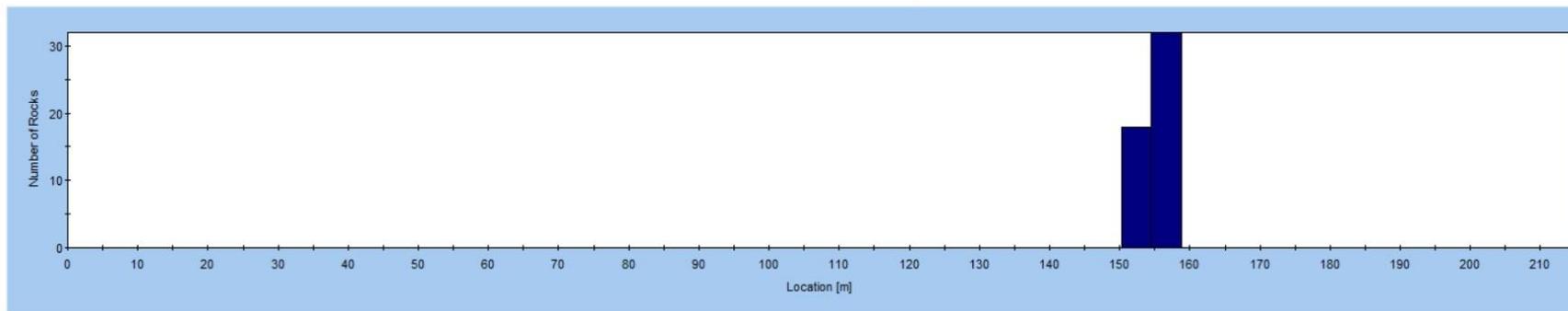


# Результат поверочного расчёта в двумерной постановке

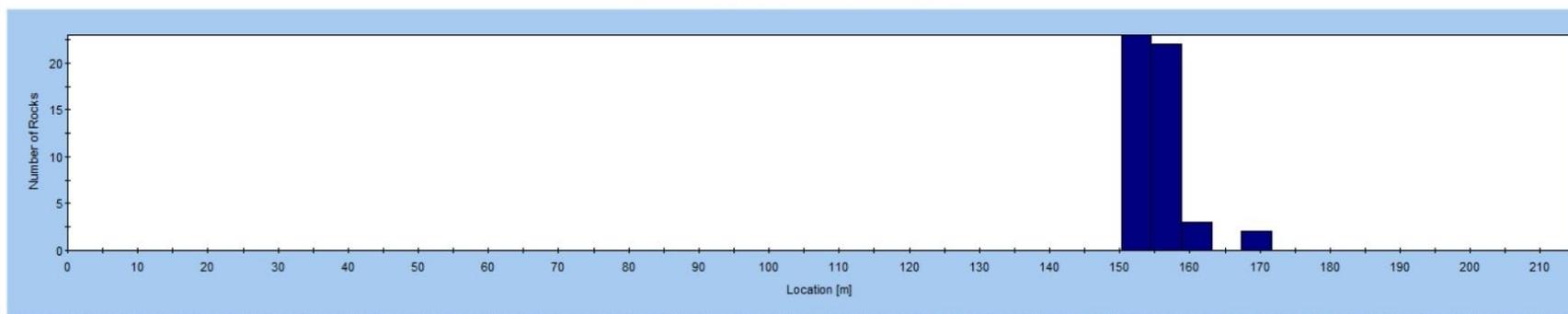


В результате поверочного расчёта, реализующего модель материальной точки и стереомеханическую модель удара, установлено, что, в случае учёта в рассматриваемом примере микрорельефа, порядка 10 % (5 из 50) обломков горных пород преодолевают улавливающее сооружение и достигают защищаемого объекта.

Horizontal Location of Rock End-points



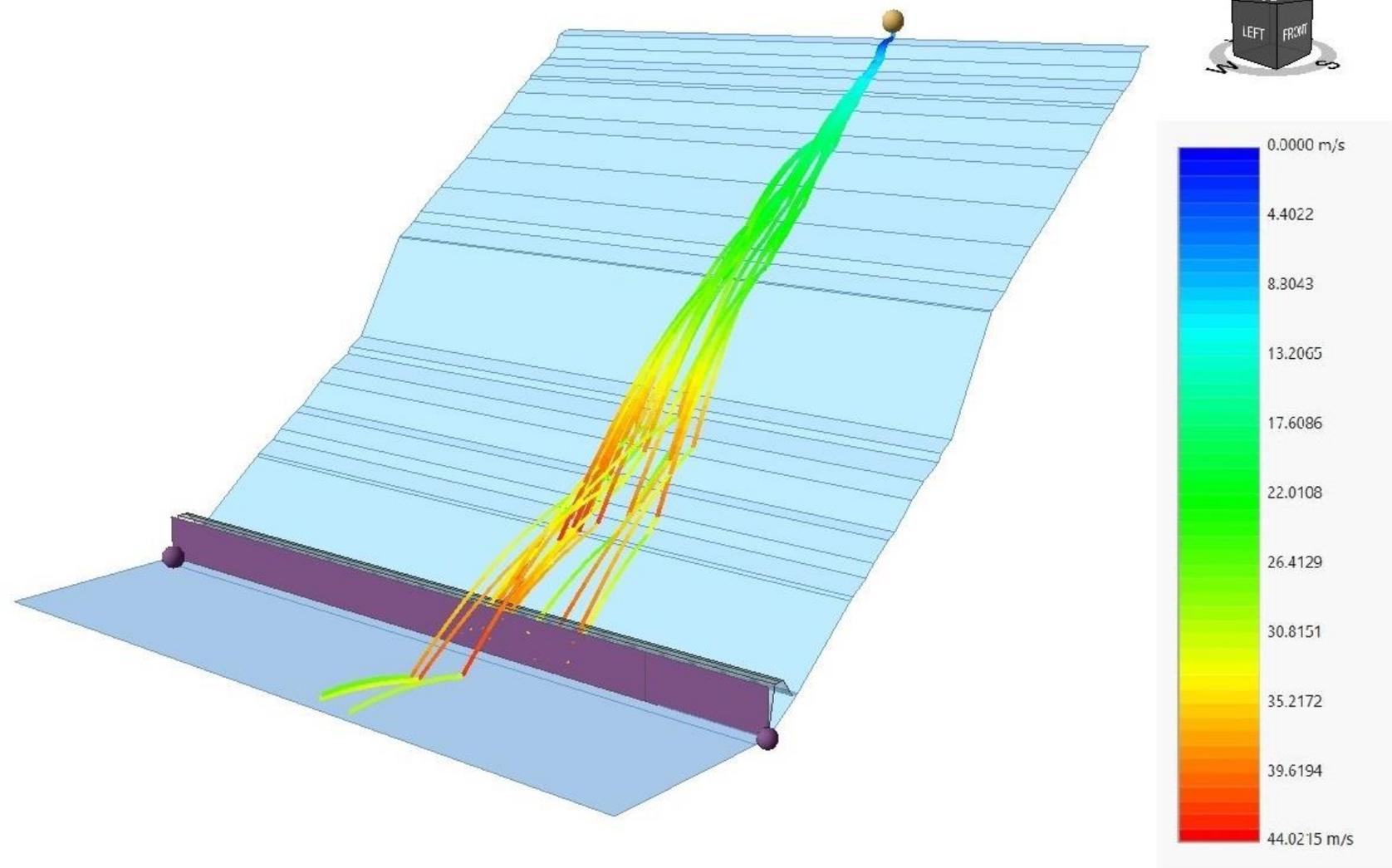
Horizontal Location of Rock End-points



# Поверочный расчет в трехмерной постановке



Дополнительный поверочный расчёт был выполнен в программе RocFall3, также разработанной компанией Rocscience и реализующей модель твёрдого тела (RBIM) и вероятностные методы моделирования (Latin Hypercube, Monte Carlo).

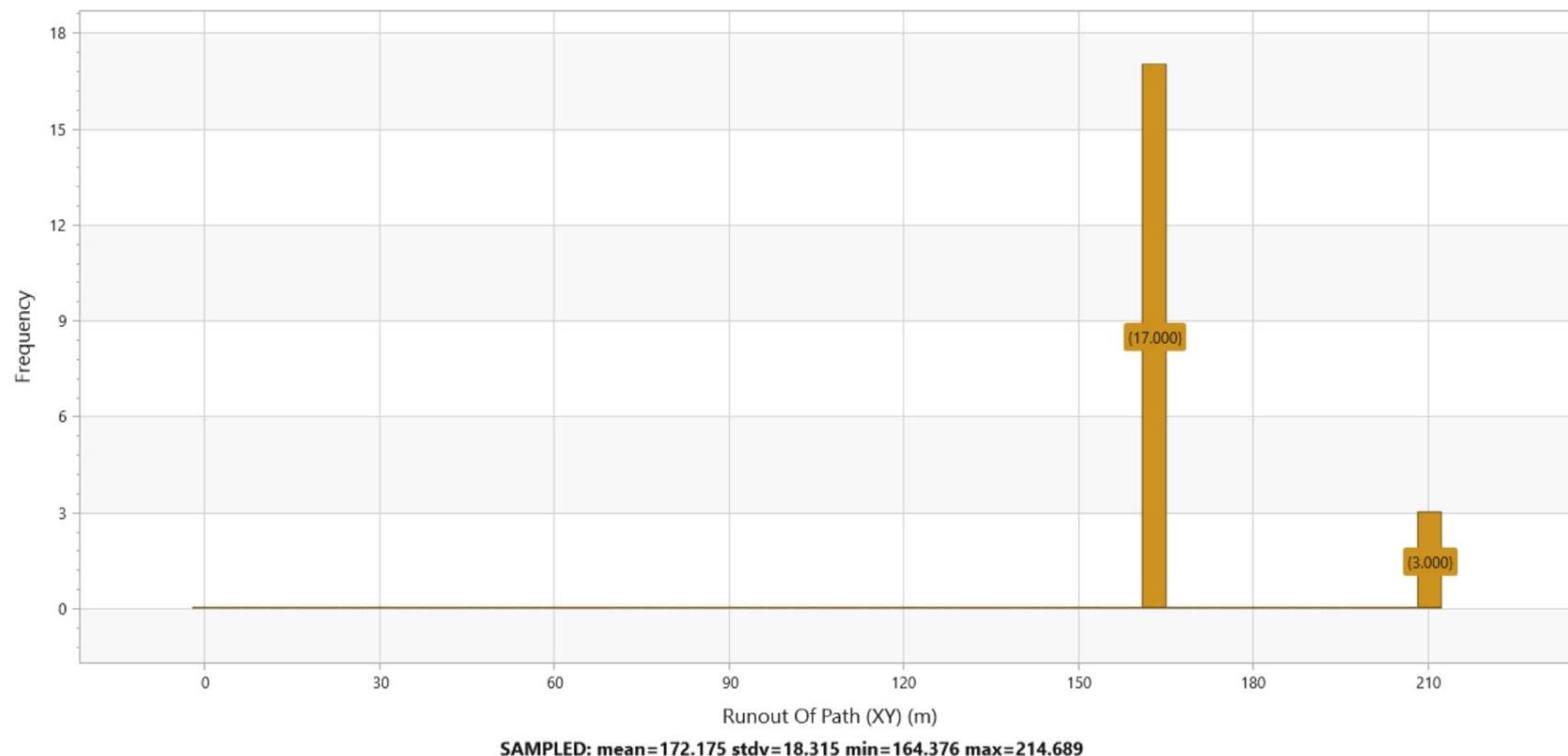


# Результат поверочного расчёта в трехмерной постановке



В результате дополнительного поверочного расчёта, реализующего модель твёрдого тела (RBIM), установлено, что, в случае учёта в рассматриваемом примере микрорельефа, порядка 15 % (3 из 20) обломков горных пород преодолевают улавливающее сооружение и достигают защищаемого объекта.

Distribution of Runout Of Path (XY) (m) - Origin





На основании выполненных поверочных расчётов сделаны следующие выводы:

1. Расчёт улавливающих сооружений, проектируемых в составе средств противообвальной (противокаменной) защиты, с помощью аналитических методов расчёта, не учитывающих или учитывающих не в полной мере такие факторы, как размер и форма камня, микрорельеф горного склона, физико-механические свойства грунтов поверхностного покрова, вращательное движение, воздушное сопротивление и возможную фрагментацию камней, может приводить к частично ошибочному выбору места расположения и габаритных размеров улавливающих сооружений и, соответственно, к недооценке опасности и увеличению риска повреждения защищаемых объектов.
2. Проектирование улавливающих сооружений рекомендуется выполнять на основе крупномасштабных топографических съёмок (1:200 – 1:500), содержащих максимально подробное описание скально-обвального участка и позволяющих с высокой точностью описать микрорельеф склона.
3. Расчёты на перелёт и на выкатывание (подскакивание), выполняемые аналитическими методами, рекомендуется дублировать расчётами с использованием численных методов, реализующих в себе модель материальной точки и стереомеханическую модель удара (или модель твёрдого тела (RBIM), или модель дискретного элемента (DEM)), позволяющими определять путем вероятностного моделирования расчётные траектории движения камней на всём протяжении склона (от места вывала до расположения защищаемого объекта), тем самым повышая надёжность принимаемых технических решений.



**Спасибо за внимание!**

Контакты для обратной связи:

Email: [lentyukov.savelij@inbox.ru](mailto:lentyukov.savelij@inbox.ru)

Tel.: + 7 985 390 59 09