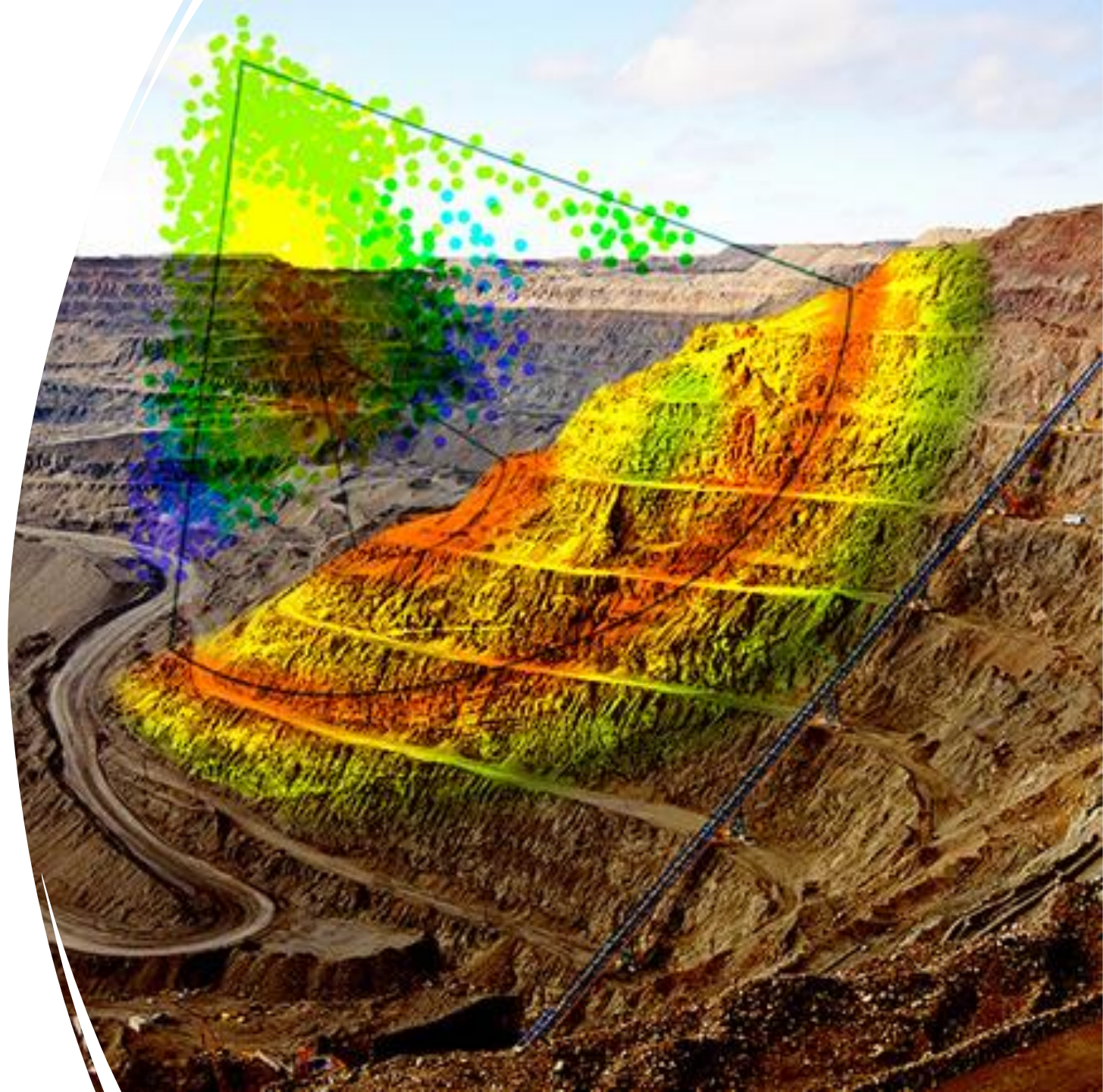


**Лекція 8.  
Розрахунок  
коефіцієнта  
запасу стійкості  
(метод  
алгебраїчних сум)**

---

**Механіка  
гірських порід**

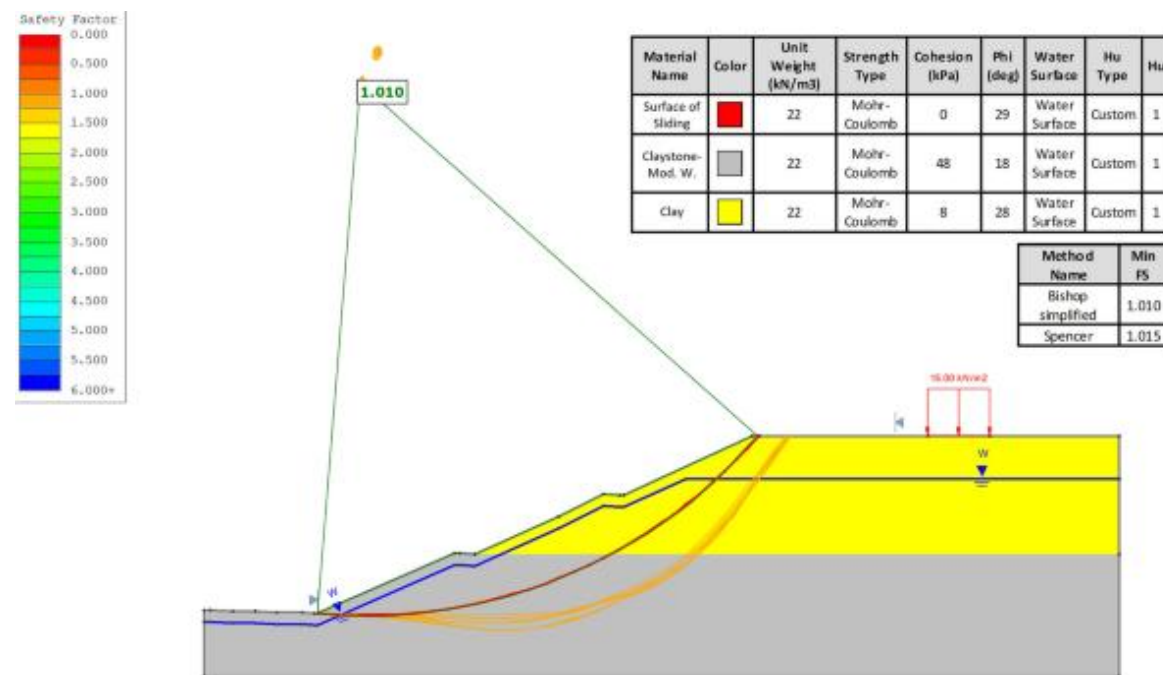
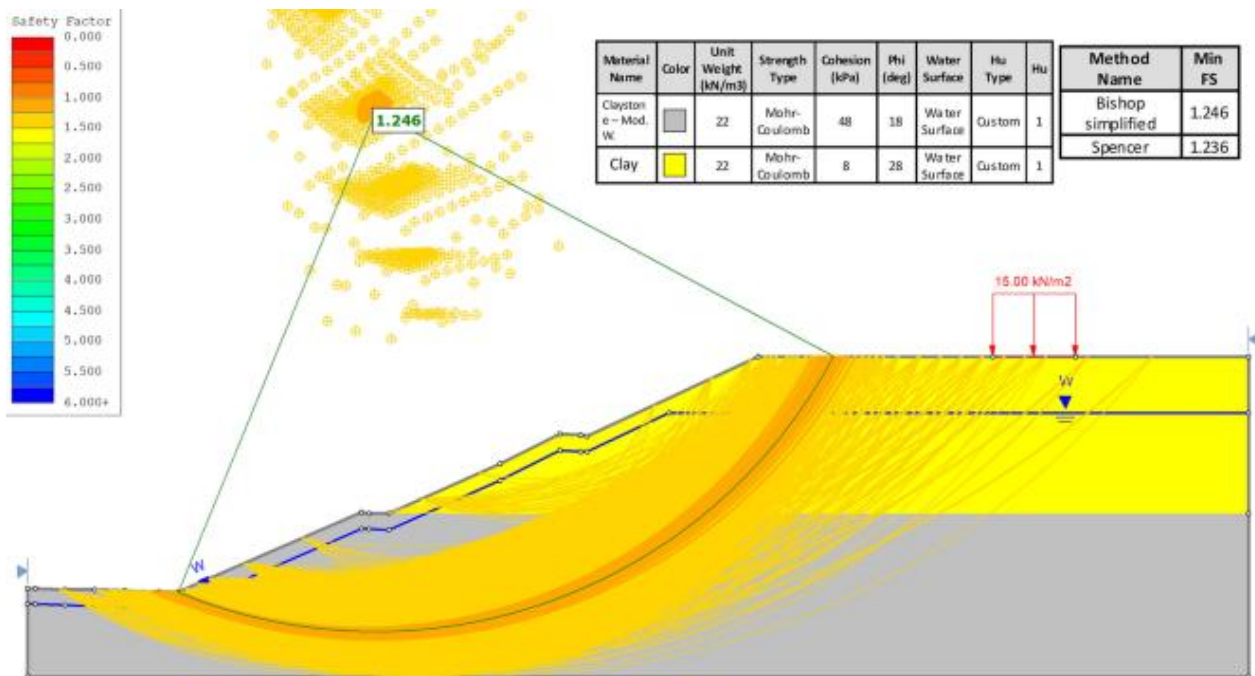




**Значення оцінки стійкості гірських схилів,  
уступів та масивів у гірництві**



Оцінка стійкості гірських укосів та виробок є обов'язковим етапом проектування гірничих об'єктів. Вона виконується з метою прогнозування можливості зсувів та визначення заходів для їх попередження. Результатом такого оцінювання є розрахунок **коефіцієнта запасу стійкості**, який характеризує здатність масиву чинити опір зсувним деформаціям. Цей коефіцієнт дозволяє кількісно оцінити надійність елементів гірничої системи та визначити межі їх безпечної експлуатації.





# Теоретичні основи стійкості масивів

# Вага (сила тяжіння)

Сила ваги є головною рушійною силою, що сприяє зсуву масиву вздовж потенційної поверхні ковзання. Вона діє вертикально вниз і визначається як:

$$W = \gamma \cdot V$$

де  $W$  – вага блоку (Н),

$\gamma$  – об'ємна вага гірської породи (Н/м<sup>3</sup>),

$V$  – об'єм блоку (м<sup>3</sup>).

Компонента ваги, спрямована вздовж поверхні ковзання, виконує роль **зсувної сили**, тоді як перпендикулярна компонента створює **нормальний тиск**, що протидіє зсуву.

# Сила тертя

Сила тертя виникає внаслідок взаємодії контактних поверхонь між зсувними масами. Вона є функцією нормального тиску і кута внутрішнього тертя породи:

$$T = N \cdot \tan\varphi$$

де  $T$  — сила тертя (Н),

$N$  — сила нормального тиску на поверхню ковзання (Н),

$\varphi$  — внутрішній кут тертя породи (град).

Сила тертя відіграє ключову роль у забезпеченні стабільності масиву, особливо для порід з низьким коефіцієнтом зчеплення.

# Сила зчеплення

Зчеплення (когезія) відображає здатність породи чинити опір зсуву за рахунок міжчасткових зв'язків у твердому тілі. Це сила, що не залежить від нормального тиску і діє вздовж всієї поверхні ковзання:

$$C = c \cdot l$$

де  $C$  – сила зчеплення (Н),

$c$  – питоме зчеплення (Па),

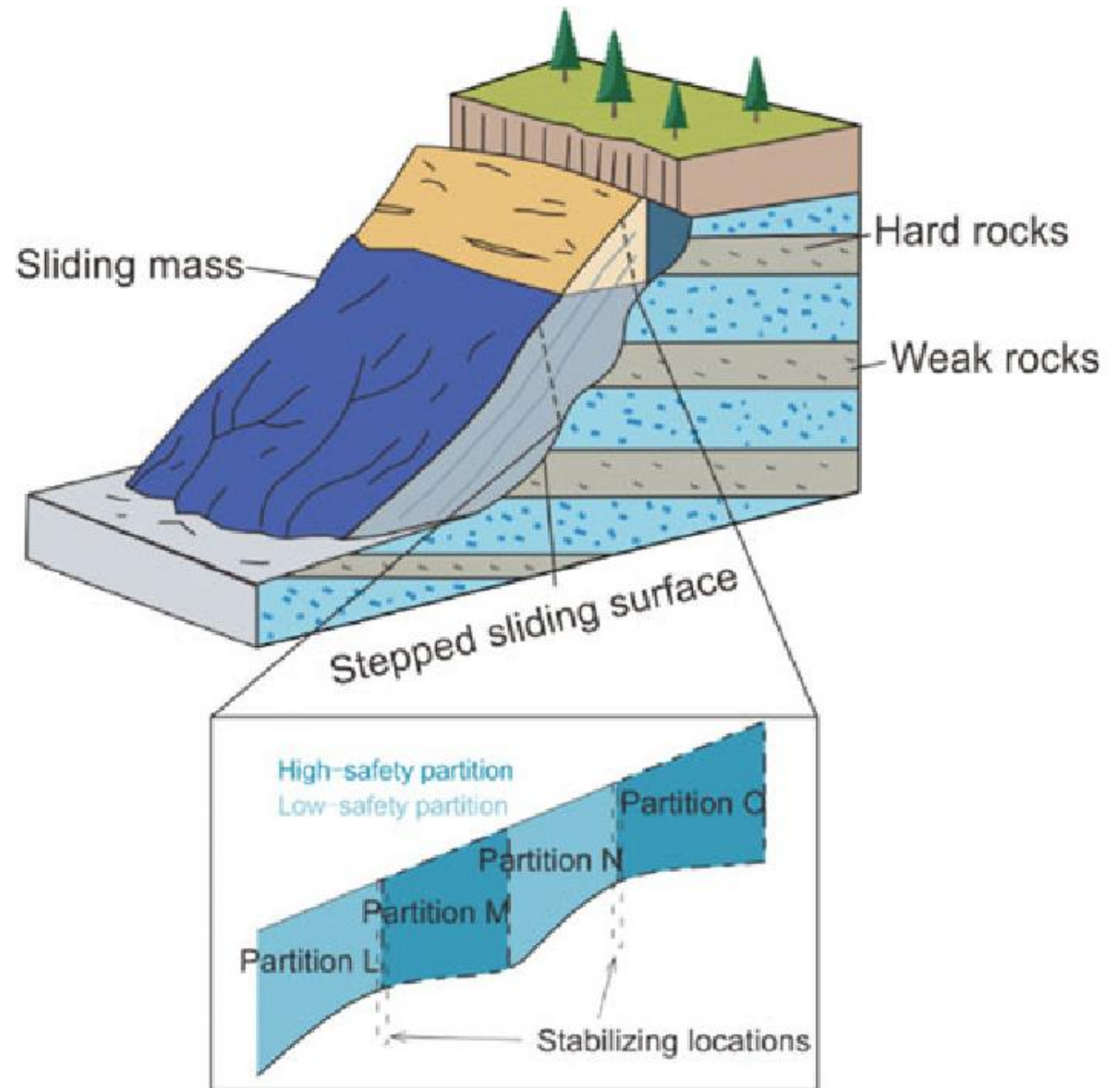
$l$  – довжина (або площа) поверхні ковзання (м або м<sup>2</sup>).

Зчеплення має особливе значення в умовах зниженої сили тертя або при наявності зв'язної породи (наприклад, глини, консолідовані осадові породи).



# Поверхня ковзання

Усі перелічені сили розглядаються в контексті умовної поверхні ковзання — гіпотетичної межі, вздовж якої може відбутися порушення цілісності масиву. Визначення величини цих сил є ключовим етапом для подальшого розрахунку коефіцієнта запасу стійкості, який кількісно характеризує ступінь стабільності об'єкта у даних геомеханічних умовах.



# Визначення терміну «коефіцієнт запасу стійкості»

Коефіцієнт запасу стійкості є головною розрахунковою характеристикою, яка кількісно оцінює здатність гірського масиву або його частини (схилу, уступу, блоку) протидіяти руйнуванню або зсуву.

# Визначення терміну «коефіцієнт запасу стійкості»

Цей коефіцієнт відображає відношення стабілізуючих (утримуючих) сил до дестабілізуючих (зсувних), що діють на потенційно нестійку частину масиву:

$$K_{\text{ст}} = \sum F_{\text{утр}} / \sum F_{\text{зсув}}$$

де  $\sum F_{\text{утр}}$  – сума сил або моментів, що протидіють зсуву (сила тертя, сила зчеплення, частина ваги, перпендикулярна до поверхні ковзання),

$\sum F_{\text{зсув}}$  – сума сил або моментів, що сприяють зсуву (переважно компонента сили ваги уздовж поверхні ковзання, гідродинамічні впливи, тиск порової води тощо).

# Фізичний зміст коефіцієнта

Якщо  $K_{ст} > 1$ , це означає, що масив перебуває у стійкому стані — утримуючі сили перевищують зсувні, ймовірність обвалу або зсуву невелика

Якщо  $K_{ст} = 1$ , масив знаходиться у граничному стані рівноваги — навіть незначні збурення (волога, сейсміка, додаткове навантаження) можуть призвести до зсуву

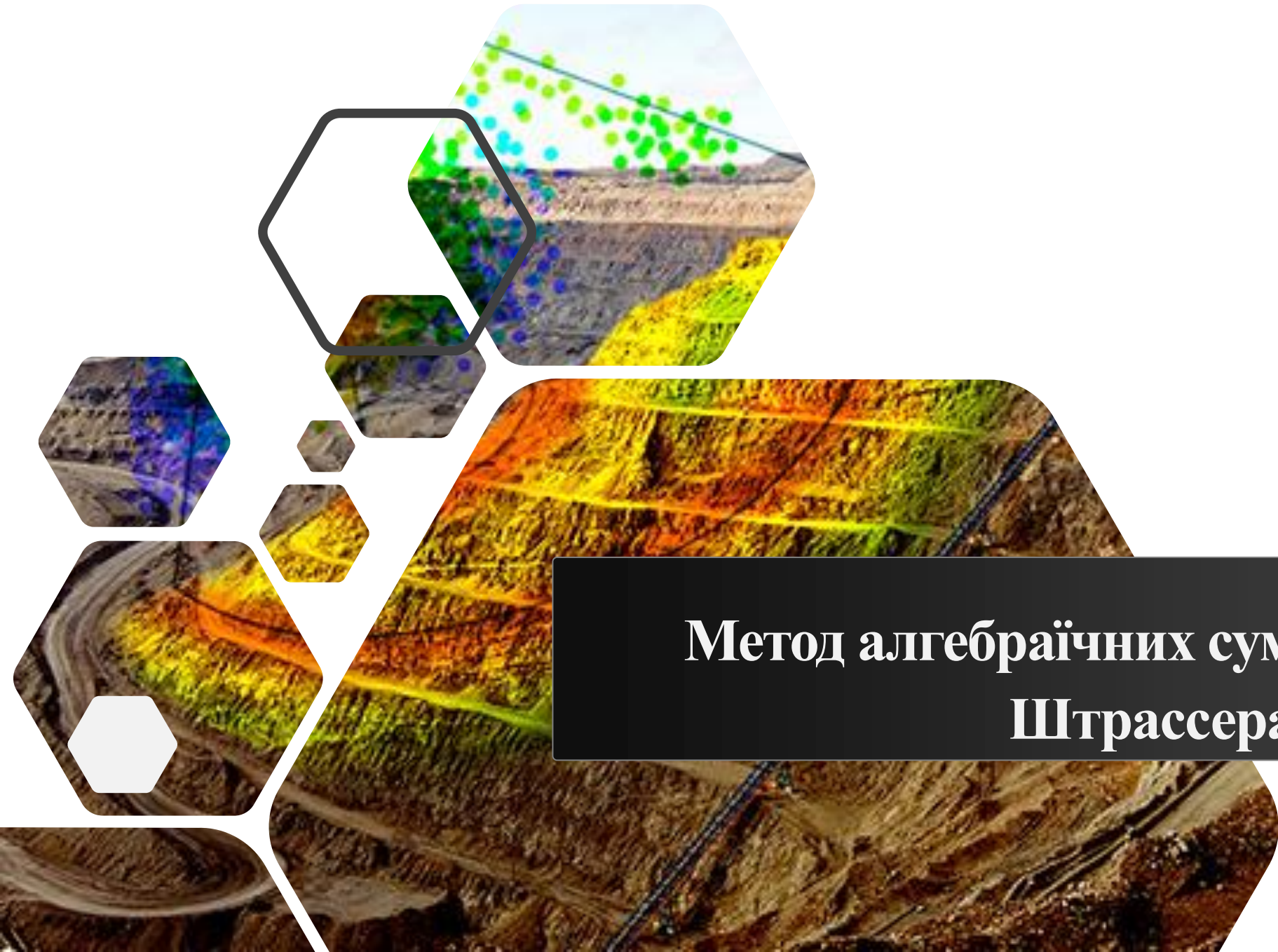
Якщо  $K_{ст} < 1$ , масив перебуває у нестійкому стані, зсув уже є фізично можливим або вже відбувається

# Значення у проектуванні

У гірничій справі коефіцієнт запасу стійкості використовується як нормативний критерій прийняття рішень щодо:

- геометрії уступів і бортів кар'єрів;
- ширини камер і стовпів у підземній розробці;
- необхідності укріплення нестійких зон;
- оцінки безпечності подальшої експлуатації гірничих виробок.

Величина допустимого  $K_{ст}$  залежить від категорії об'єкта, умов експлуатації та прийнятих нормативів. Наприклад, для тимчасових відкосів у кар'єрі допускається мінімальний  $K_{ст} = 1.1$ , тоді як для довготривалих і критичних об'єктів цей коефіцієнт має перевищувати 1.3–1.5.



## Метод алгебраїчних сум (метод Мор-Штрассера)



# Ключова ідея методу

У межах потенційно нестійкої зони (наприклад, блоку на похилій поверхні або сегменту уступу) здійснюється **баланс алгебраїчних сум сил (або моментів)**.

Умову стійкості формують як:

$$K_{\text{ст}} = \sum F_{\text{утр}} / \sum F_{\text{зсув}}$$

де  $\sum F_{\text{утр}}$  — сумарні утримуючі сили (включаючи тертя та зчеплення),  
 $\sum F_{\text{зсув}}$  — сумарні сили, що сприяють переміщенню вздовж поверхні ковзання.



# Розрахункова схема:

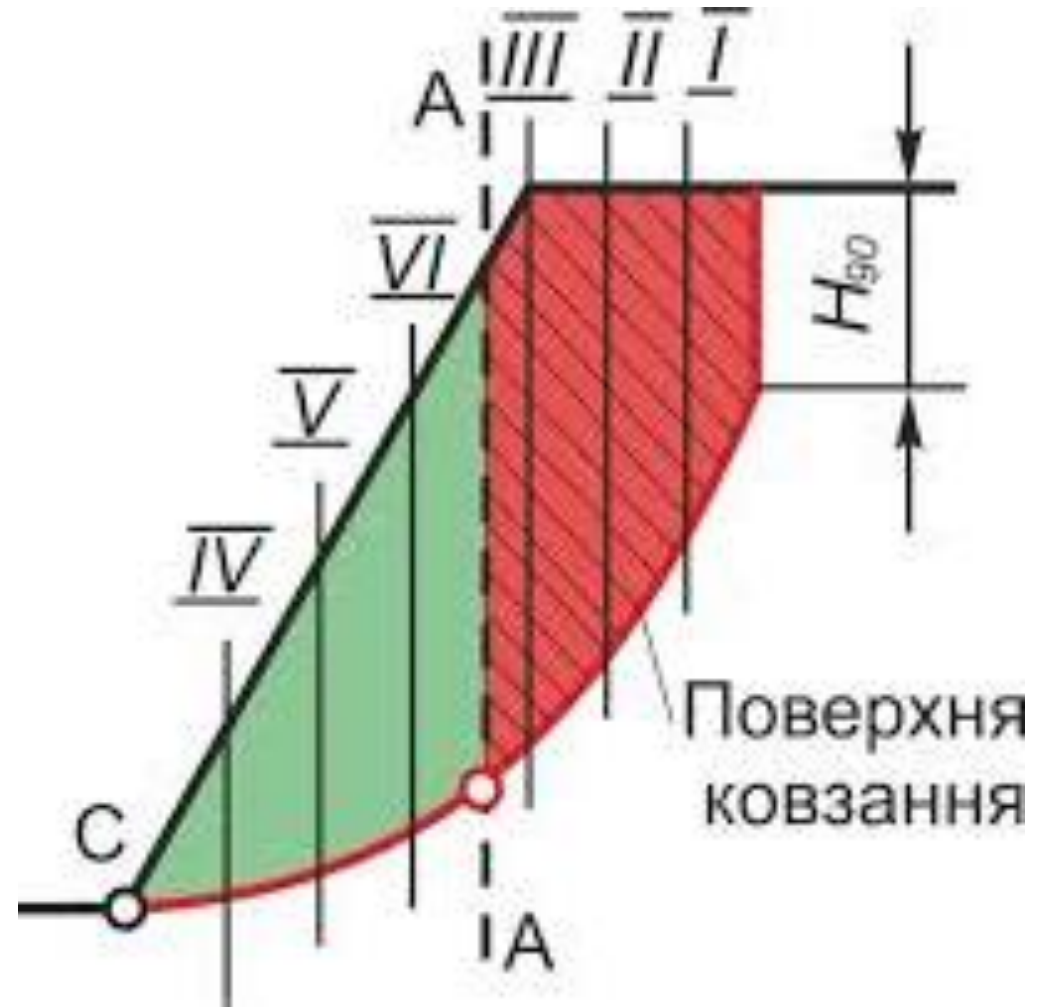


Розглядається типова геометрична конфігурація: блок або сукупність блоків, що лежать на похилій поверхні ковзання

Кожен блок аналізується як окрема розрахункова одиниця — на нього діють відомі сили: вага, реакція поверхні, сила тертя, сила зчеплення, поровий тиск (за наявності)

Виконується розклад сил на компоненти, які діють уздовж та перпендикулярно до умовної поверхні ковзання

Сили, спрямовані вниз по схилу, інтерпретуються як зсувні; сили, спрямовані проти зсуву, — як утримуючі





### Загальний підхід

1. Ідентифікується можливий механізм руйнування (траєкторія зсуву).
2. Встановлюється розрахункова поверхня ковзання.
3. Здійснюється розрахунок всіх сил (вага, тертя, зчеплення, дія води).
4. Знаходиться значення коефіцієнта запасу стійкості як відношення утримуючих до зсувних сил.

# Метод алгебраїчних сум широко використовується для

попередньої інженерної оцінки стійкості схилів;

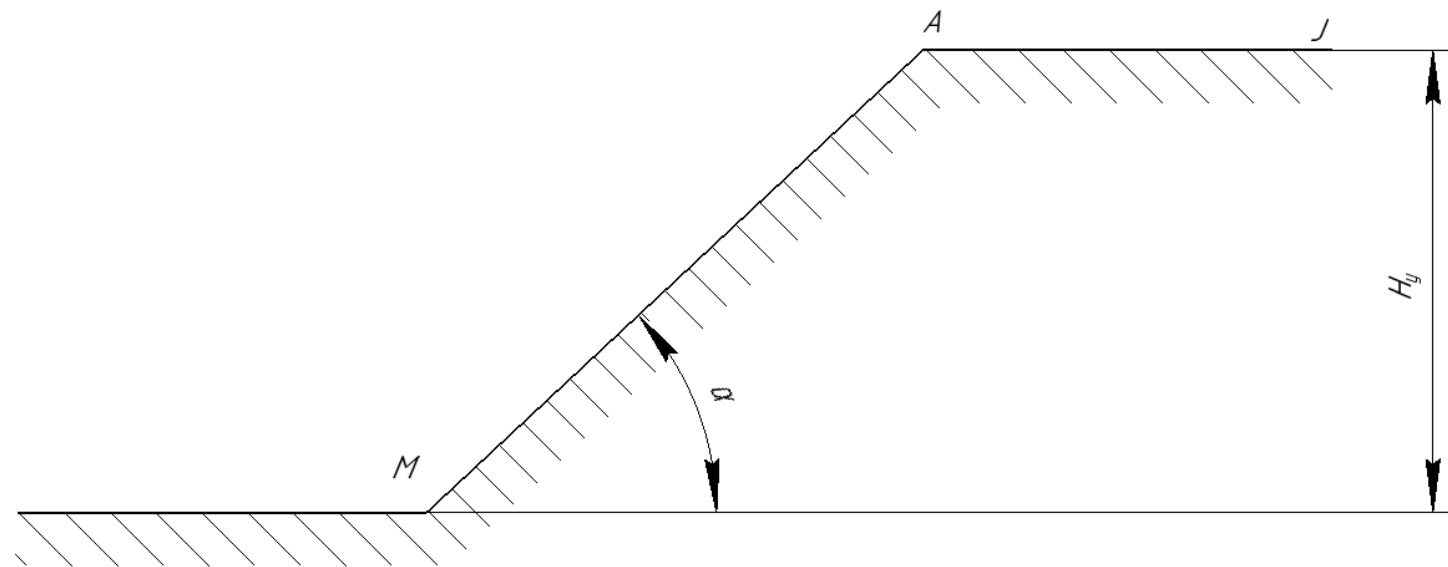
техніко-економічного обґрунтування проектних рішень;

польових та лабораторних розрахунків у межах стабільності уступів кар'єрів або породних відвалів.

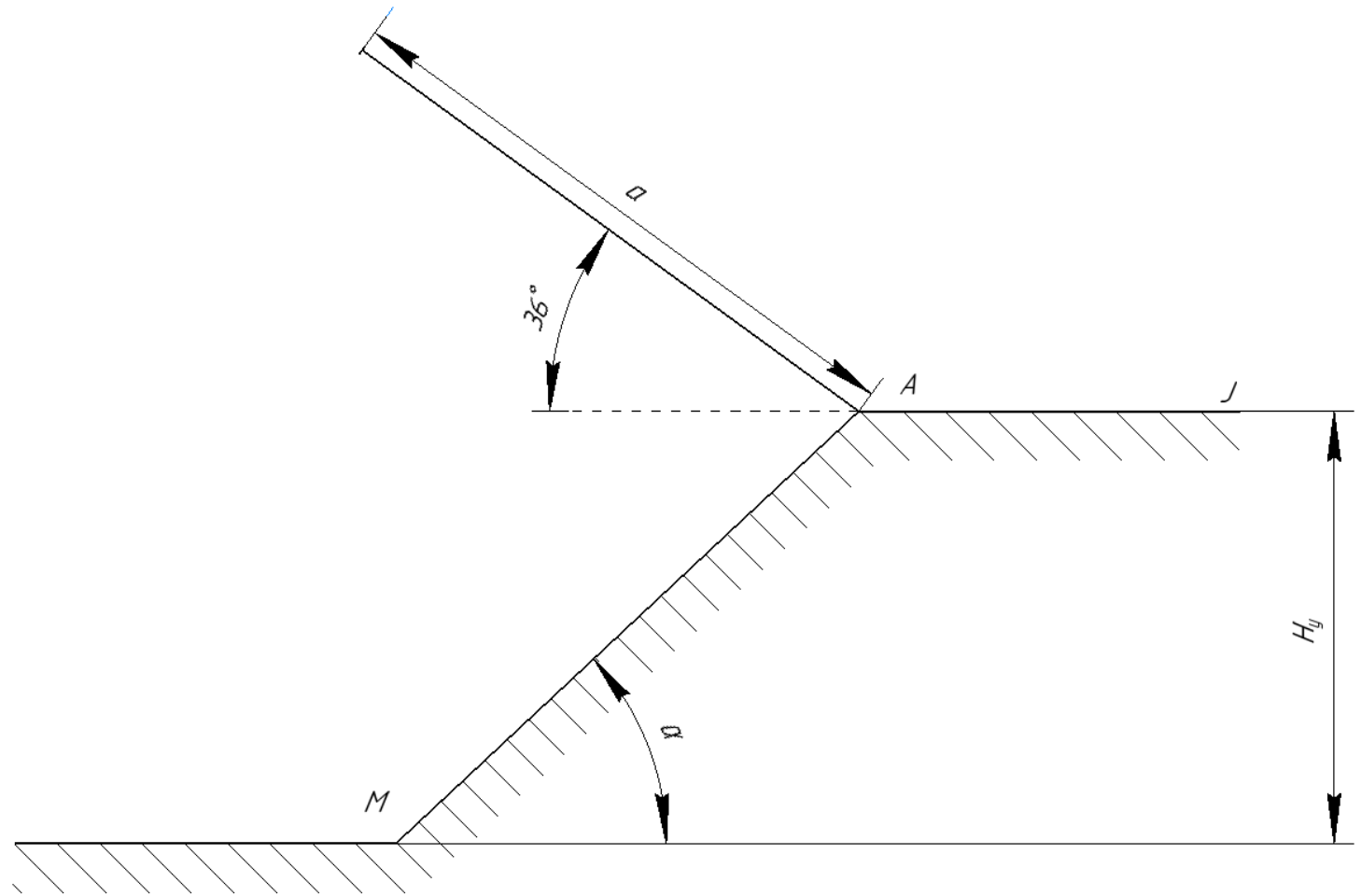


**Порядок використання методу складання  
алгебраїчних сил для визначення коефіцієнта стійкості**

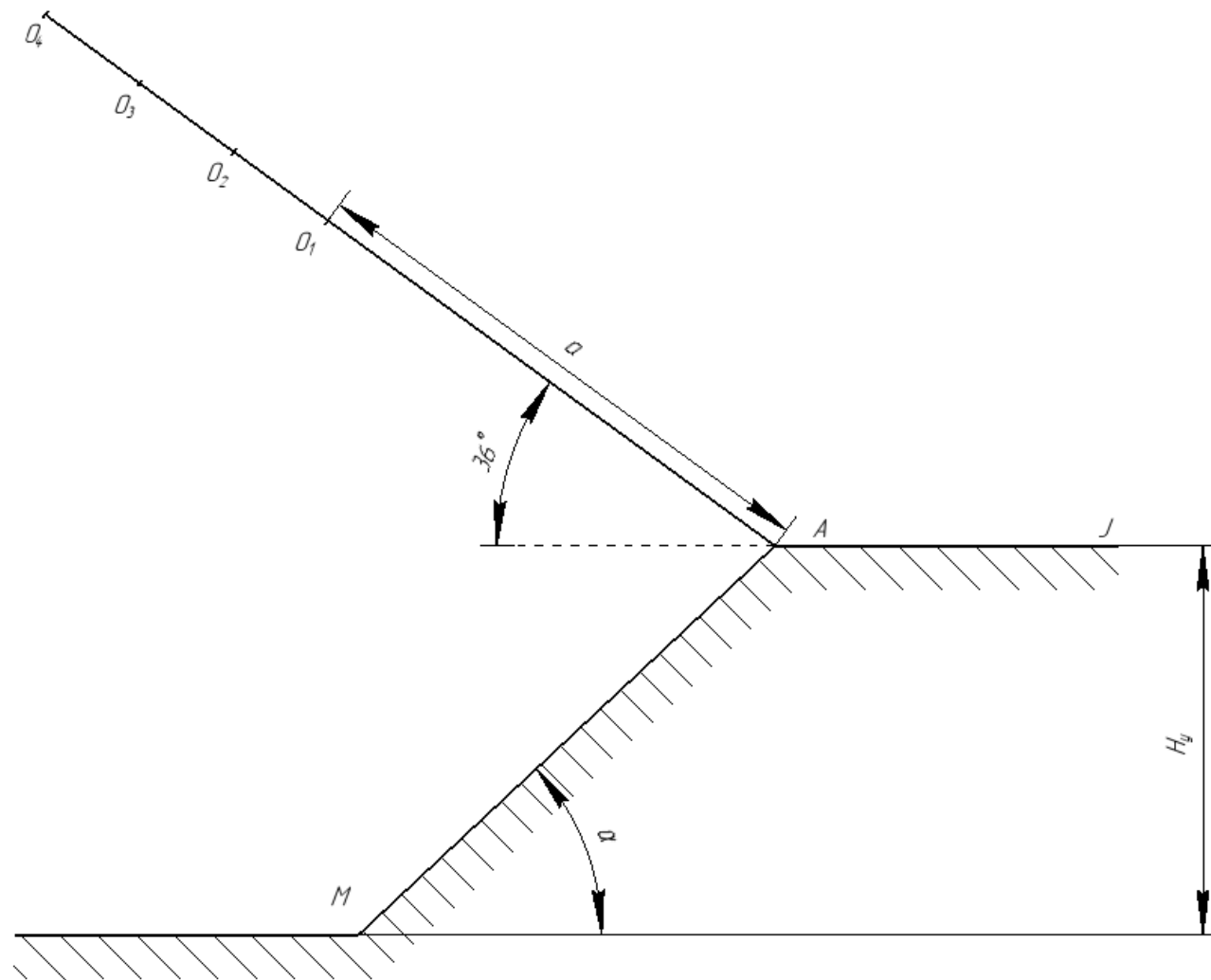
За вихідними даними в  
масштабі будуємо борт  
кар'єру МАІ.



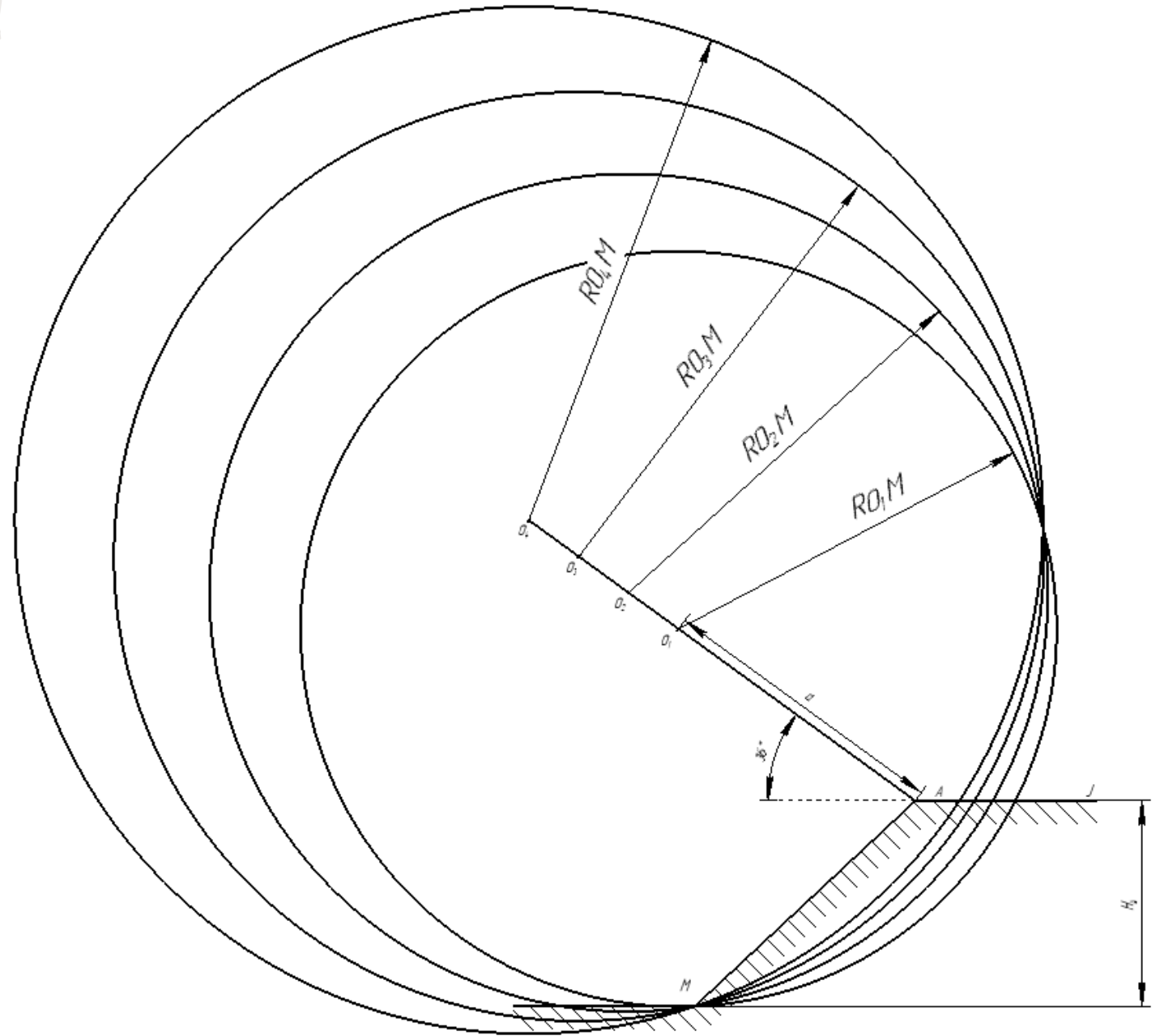
З точки А під кутом  $36^\circ$  до  
горизонтальної площини  
проводимо пряму, на якій від  
точки А на відстані  
 $H/(\operatorname{tg}\alpha \cdot \cos 36^\circ)$  та  
встановлюємо точку  $O_1$ .



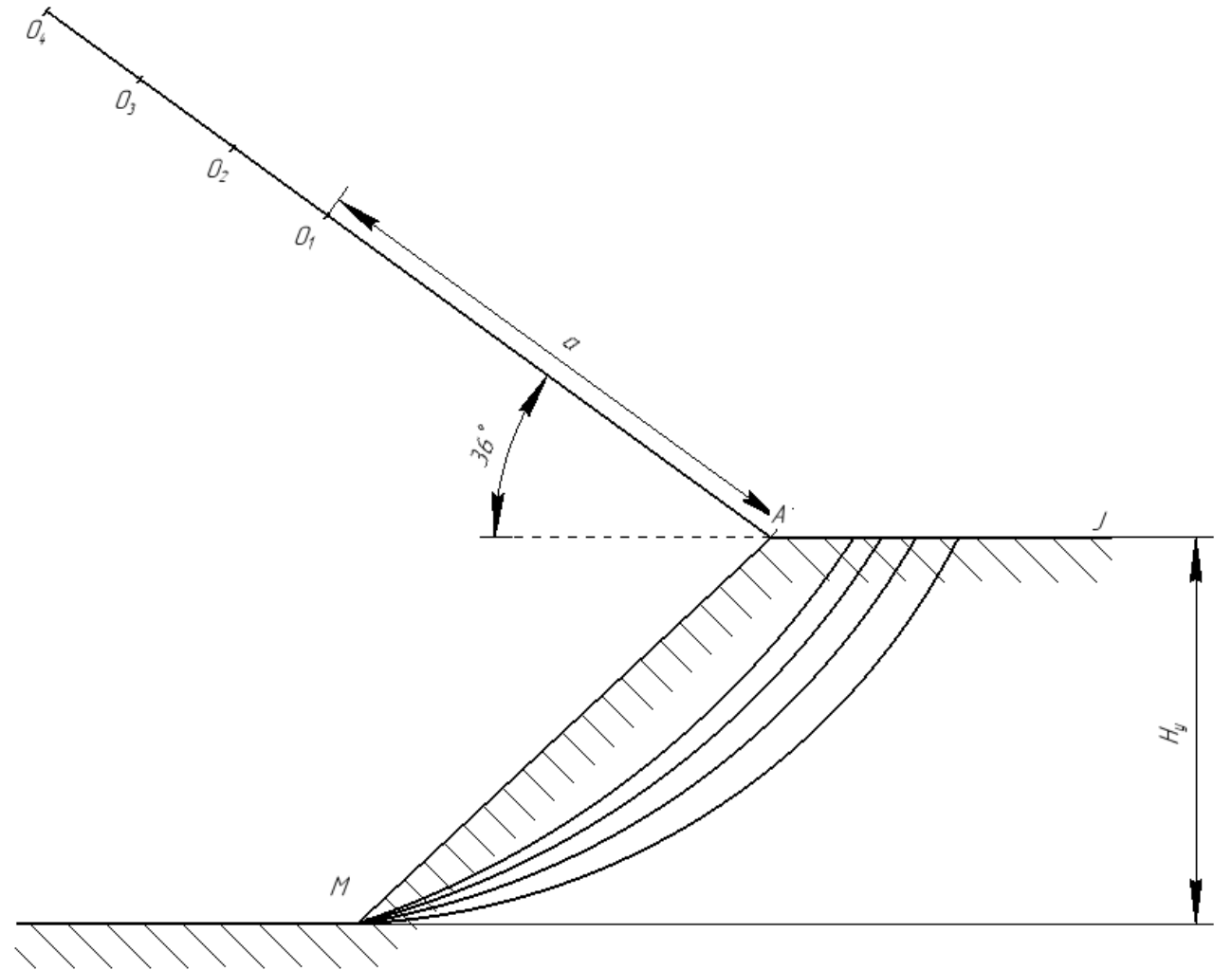
З точки  $O_1$  відкладаємо серію  
відрізків  
 $O_1O_2=O_2O_3=O_3O_4=0,3H$



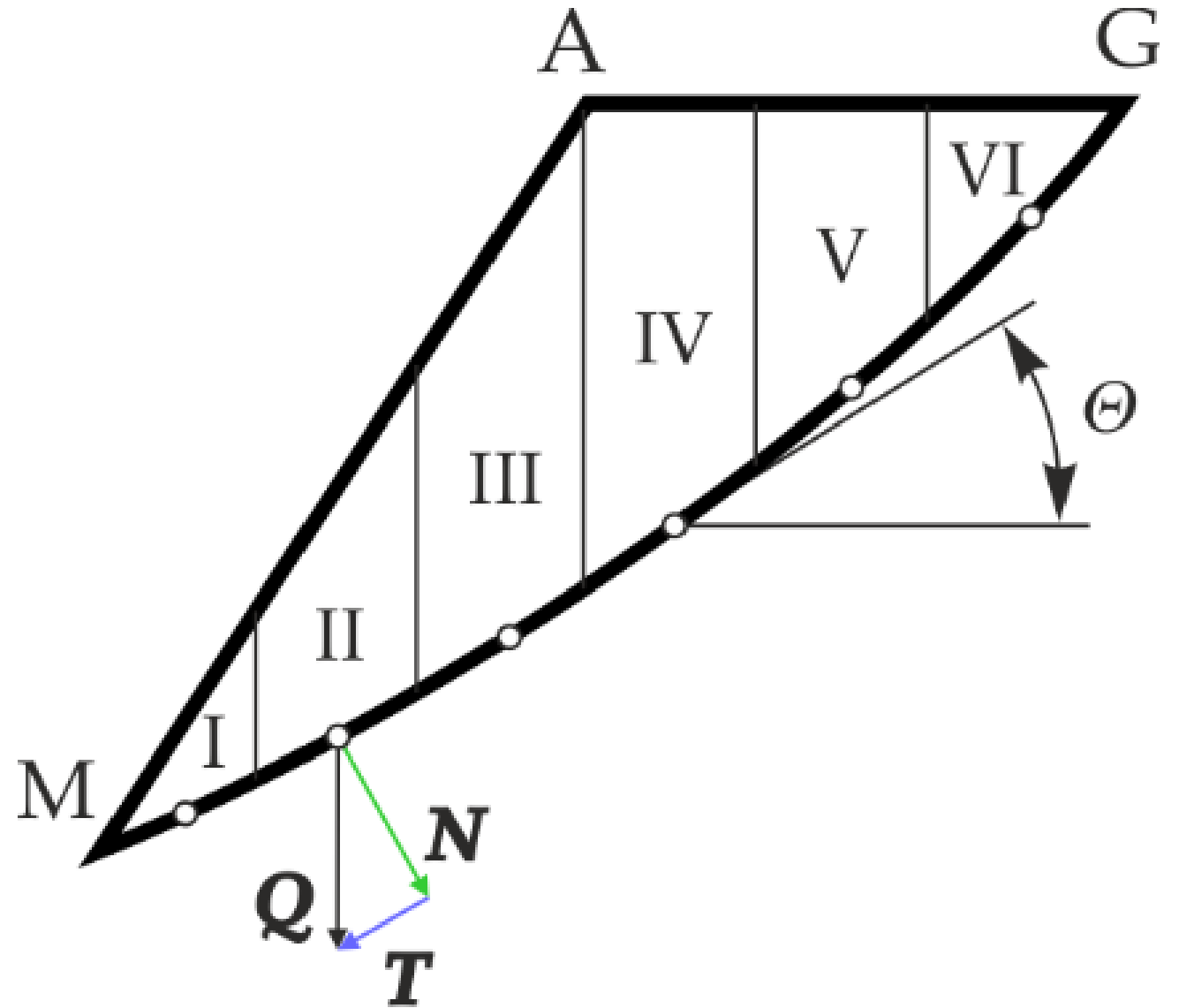
З точок  $O_1, O_2, O_3, O_4$  будемо  
дуги кіл радіусом  $O_1M, O_2M,$   
 $O_3M, O_4M$  від точки  $M$  до  
перетину з лінією  $AJ$ .



Таким чином отримаємо 4  
поверхні ковзання для даного  
відкосу.



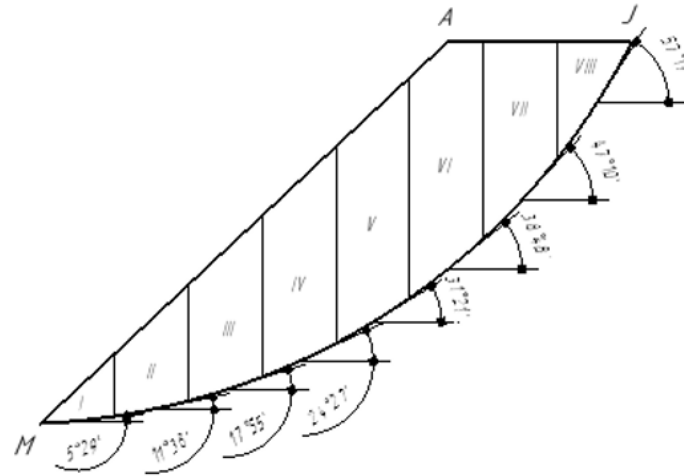
Після побудови поверхонь ковзання кожену призму обрушення викреслюємо в масштабі окремо, як показано на слайді, і розбиваємо на 6-8 блоків.



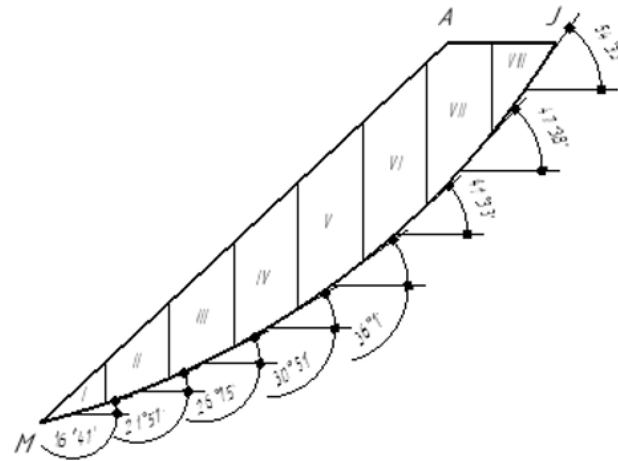


За результатом цього  
отримуємо

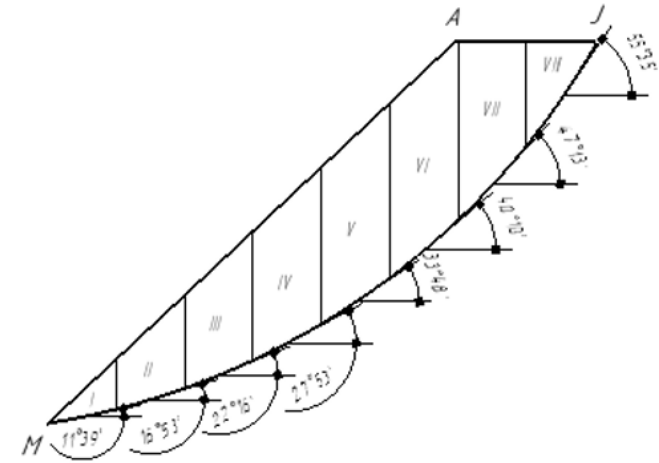
Призма зсуву №1



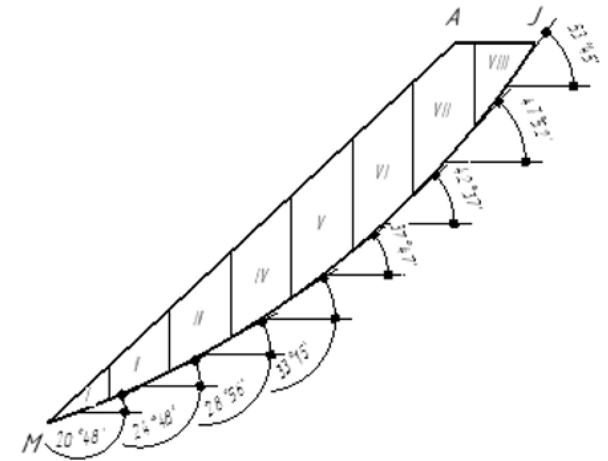
Призма зсуву №3



Призма зсуву №2



Призма зсуву №4



Визначаємо вагу кожного блоку:

$$Q = S \cdot \gamma$$

де  $S$  – площа блоку (визначається будь-яким доступним методом), м<sup>2</sup>;

$\gamma$  – об'ємна вага порід, що складають відкіс, МН/м<sup>3</sup>

Розраховуємо нормальні  $N$  і дотичні  $T$  складові вектора ваги для кожного блоку:

$$N = Q \cdot \cos \theta$$

$$T = Q \cdot \sin \theta$$

де  $Q$  – вага кожного блоку, МН;

$\theta$  – кути нахилу дотичної до центру дуги поверхні ковзання в кожному блоці

Розраховуємо коефіцієнт запасу стійкості для кожної призми обрушення за формулою:

$$n = \frac{\sum N_i \cdot \operatorname{tg} \varphi + C \cdot L}{\sum T_i}$$

де  $\sum N_i$  – сума нормальних складових вектора ваги кожного блоку, МН;

$\varphi$  – кут внутрішнього тертя;

$C$  – зчеплення в елементарному блоці, МПа;

$L$  – довжина криволінійної частини контуру призми обрушення, м;

$\sum T_i$  – сума дотичних складових вектора ваги кожного блоку, МН.

За кінцеве приймається мінімальне значення коефіцієнта запасу стійкості.

Згідно нормативних документів коефіцієнт запасу стійкості має бути не меншим 1,3. Результати вимірювань і розрахунків зводимо до спільної таблиці

№ блоку	Площа блоку $S, \text{ м}^2$	Кут нахилу дотичної $\theta^\circ$	Вага блоку $Q, \text{ МН}$	N МН	T МН	Примітки
1	2	3	4	5	6	7
<b>Призма обрушення №1</b>						
1						
2						
3						
4						L=
5						n=
6						
7						
8						
$\Sigma$						

Далі будуємо епюру значень  
коефіцієнтів запасу стійкості.  
Для цього з точок  $O_1, O_2, O_3,$   
 $O_4$  піднімаємо  
перпендикуляри до лінії  $AO_4,$   
на яких відкладаємо відрізки  
 $n_1, n_2, n_3, n_4.$

