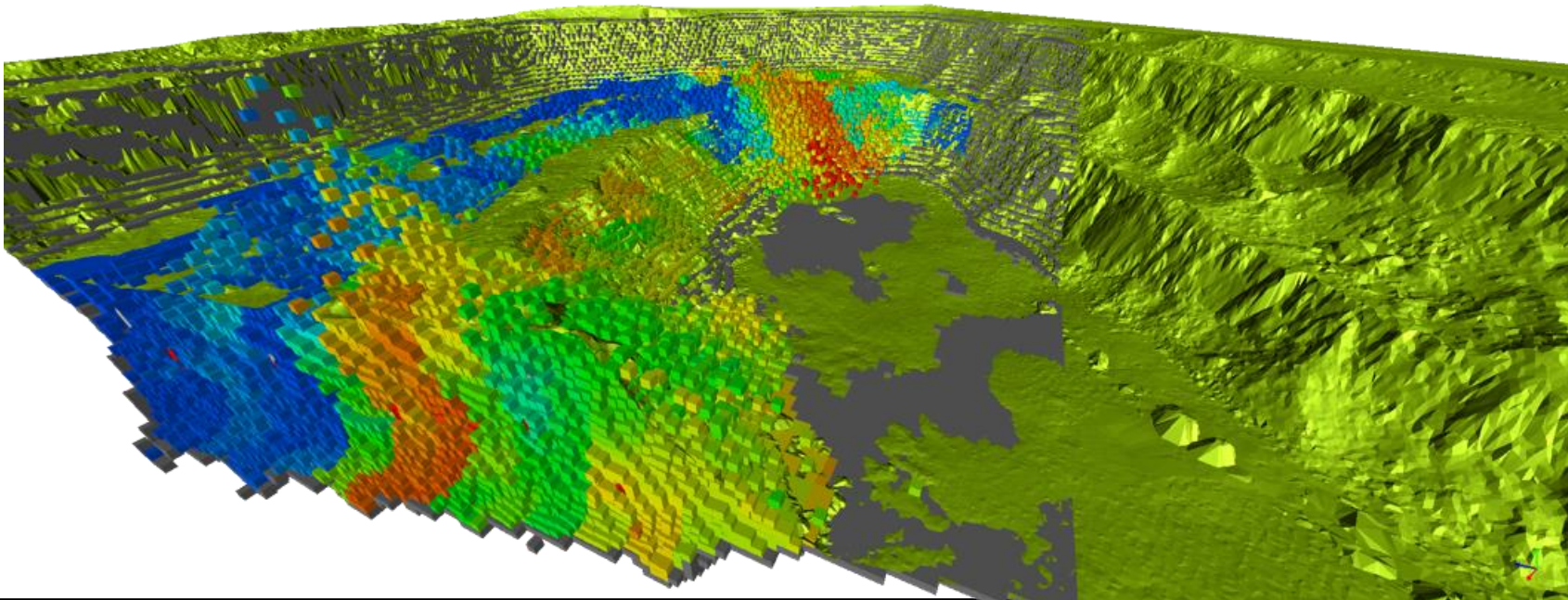




МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВАЛА ВЗРЫВА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ РУДЫ

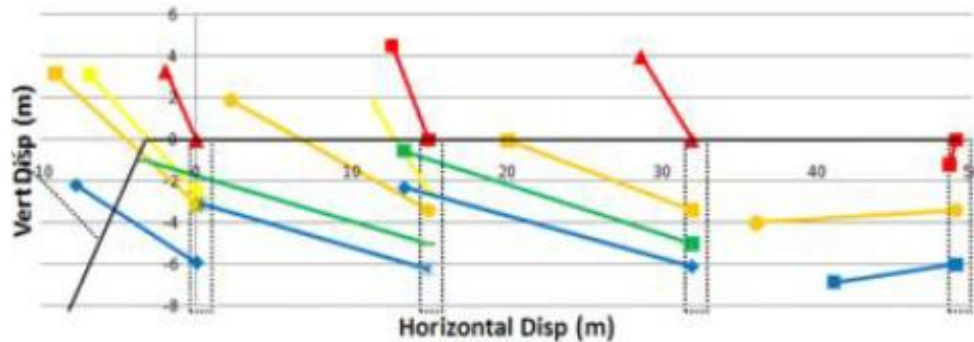
Стагурова Ольга Валентиновна



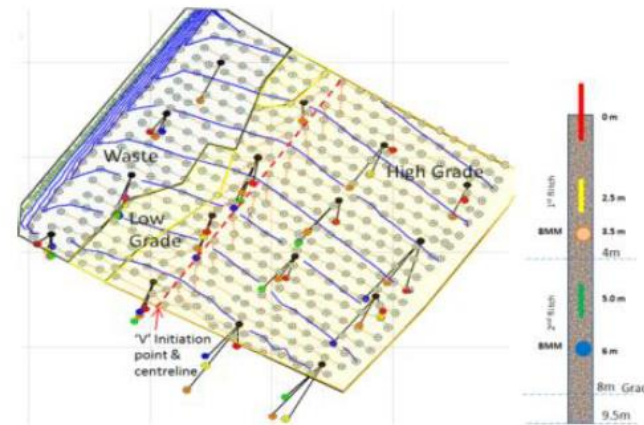
**XIII Международная научно-практическая конференция
«Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка»
Москва, 10-11 февраля 2022**

Проблема моделирования развала взрыва

Исследования показывают, что при взрыве массив перемещается в 3D, причем нелинейно, неравномерно и использовать 2D модели не совсем корректно.



Section View Blast Displacement Vectors



AP1052-211 Measured Horizontal Blast Displacement Vectors

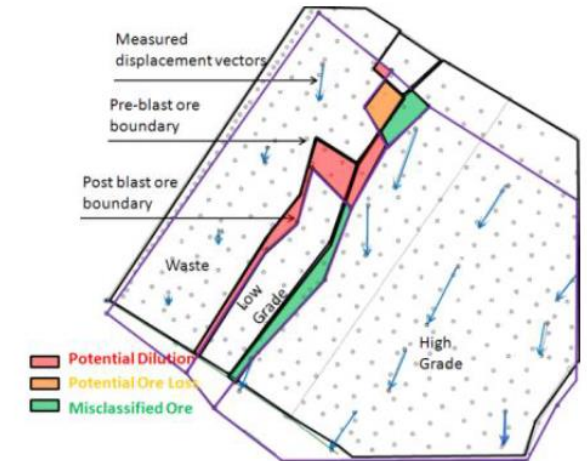
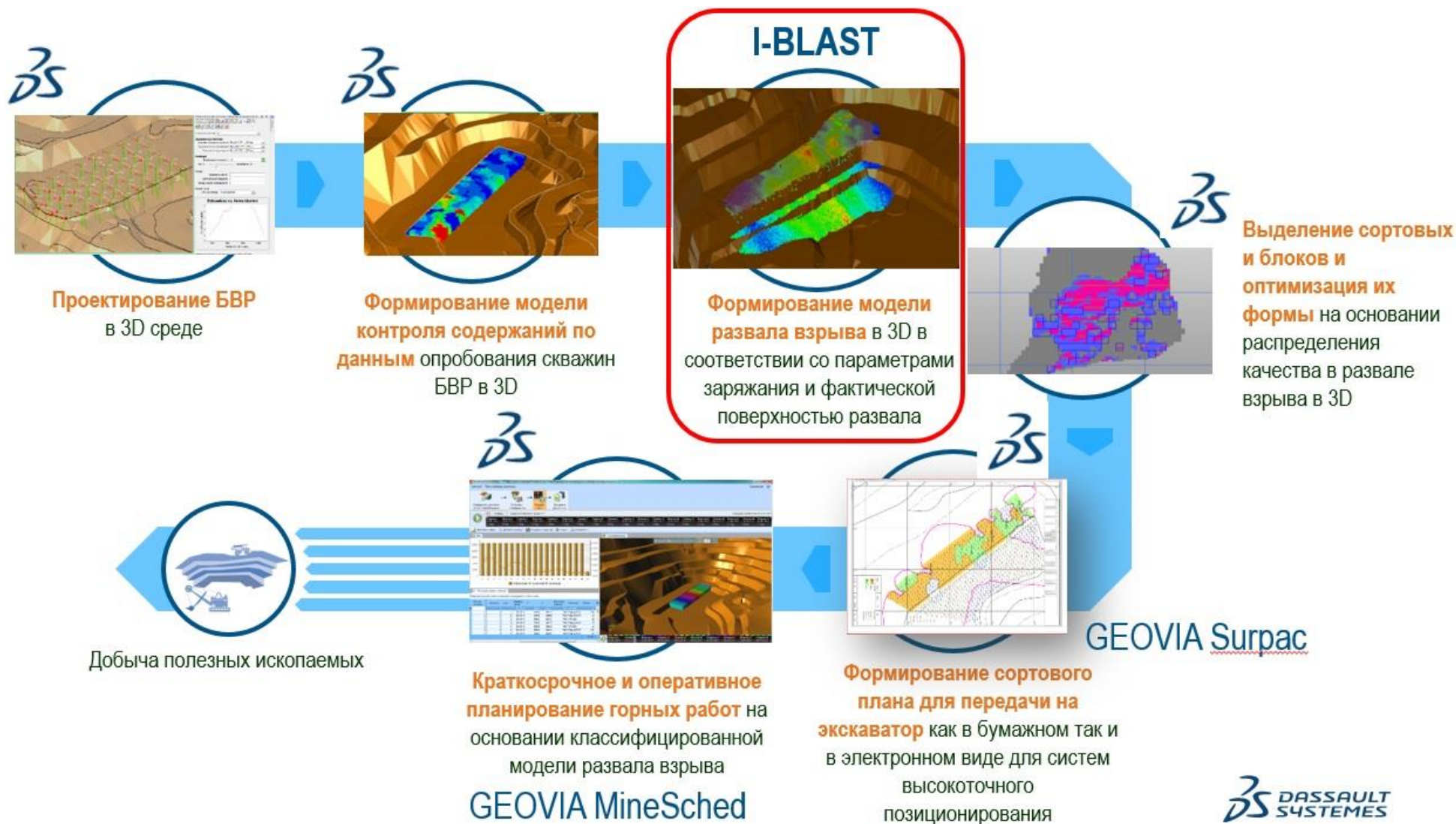


Fig. 11 2D Move Grade Displacement Model - AP1052_210 top flitch

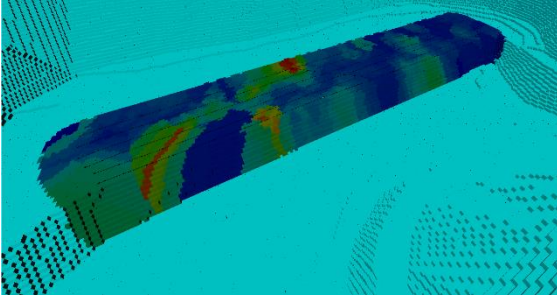
*Источник: Engmann, E., Ako, S., Bisiaux, B., Rogers, W. and Kanchibotla, S. (2013), “Measurement and Modelling of Blast Movement to Reduce Ore Losses and Dilution at Ahafo Gold Mine in Ghana”, *Ghana Mining Journal*, pp. 27 - 36.

Место модели развала взрыва в цепочке создания ценности



Формирование модели развала взрыва

Исходные данные



рудная геология

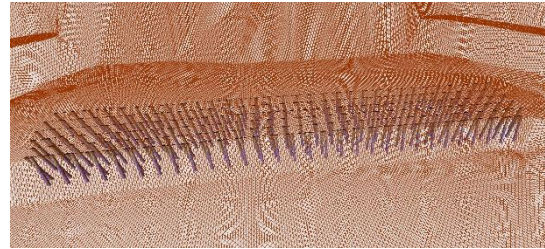
Имя	Плотность (кг/м3)	2 700.0
Демо	Скорость продольной волны (м/с)	4 410.0
	Предел прочности на сжатие (МПа)	272.60
	Предел прочности на растяжение (МПа)	10.70
	Модуль Юнга (ГПа)	45.10
	Коэффициент Пуассона	0.20
K (Сейсн)	Альфа (Сейсн)	-1.20
		1 500.00

инженерная геология

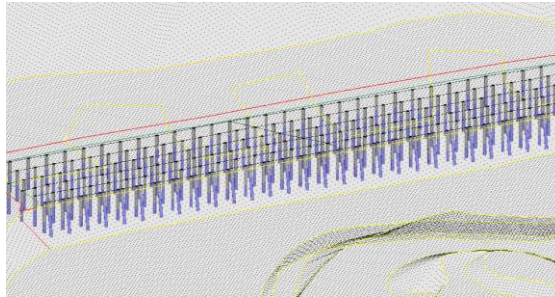


маркшейдерская съемка

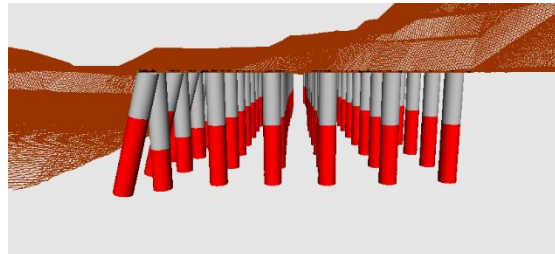
Проектирование БВР



проект на бурение

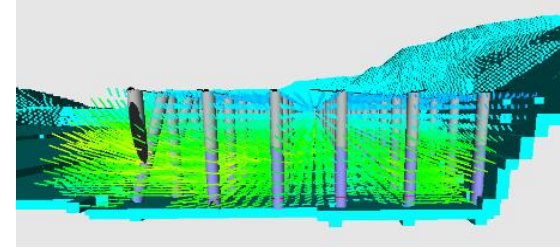


фактические скважины

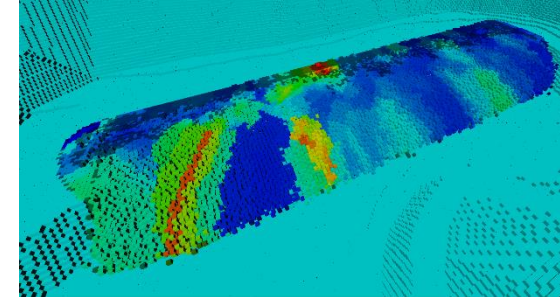


проект на взрывание

Результаты



скорости детонации



модель развала



маркшейдерская съемка

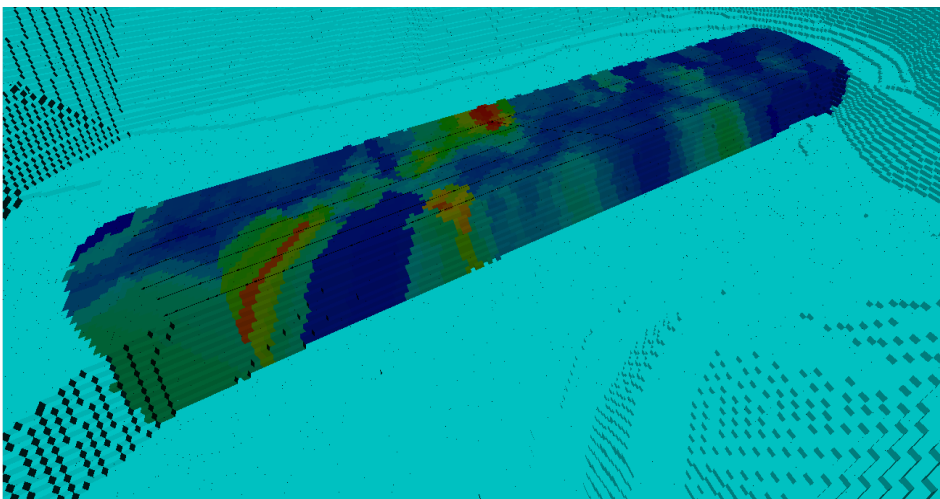
оперативное
планирование
добычи



паспорт блока
для экскаватора

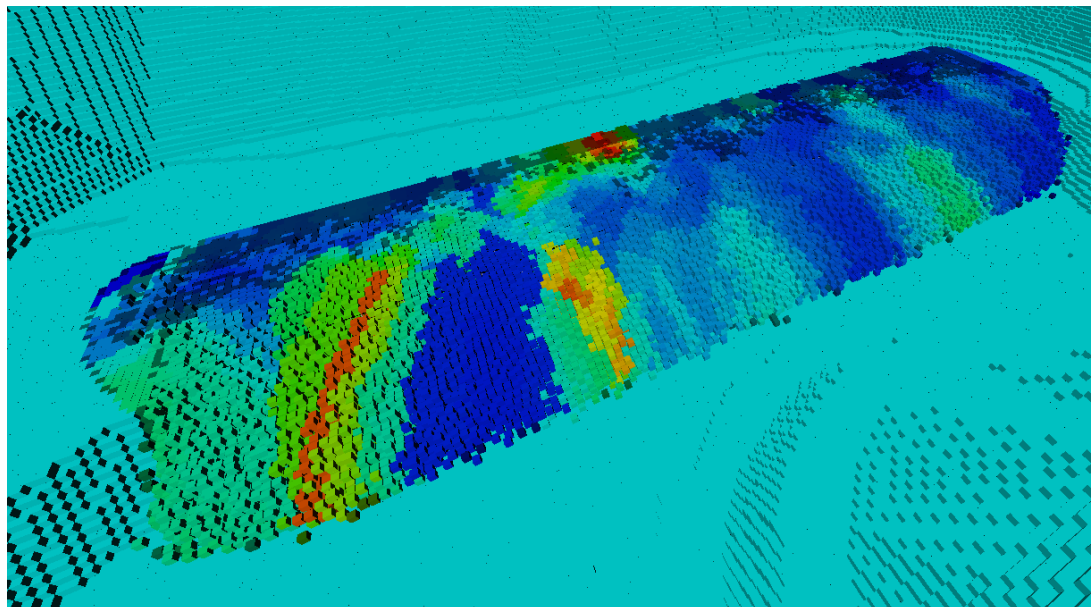
оперативный
учет добычи

Задача: знать точно геологию ПОСЛЕ взрыва, в идеале управлять взрывом

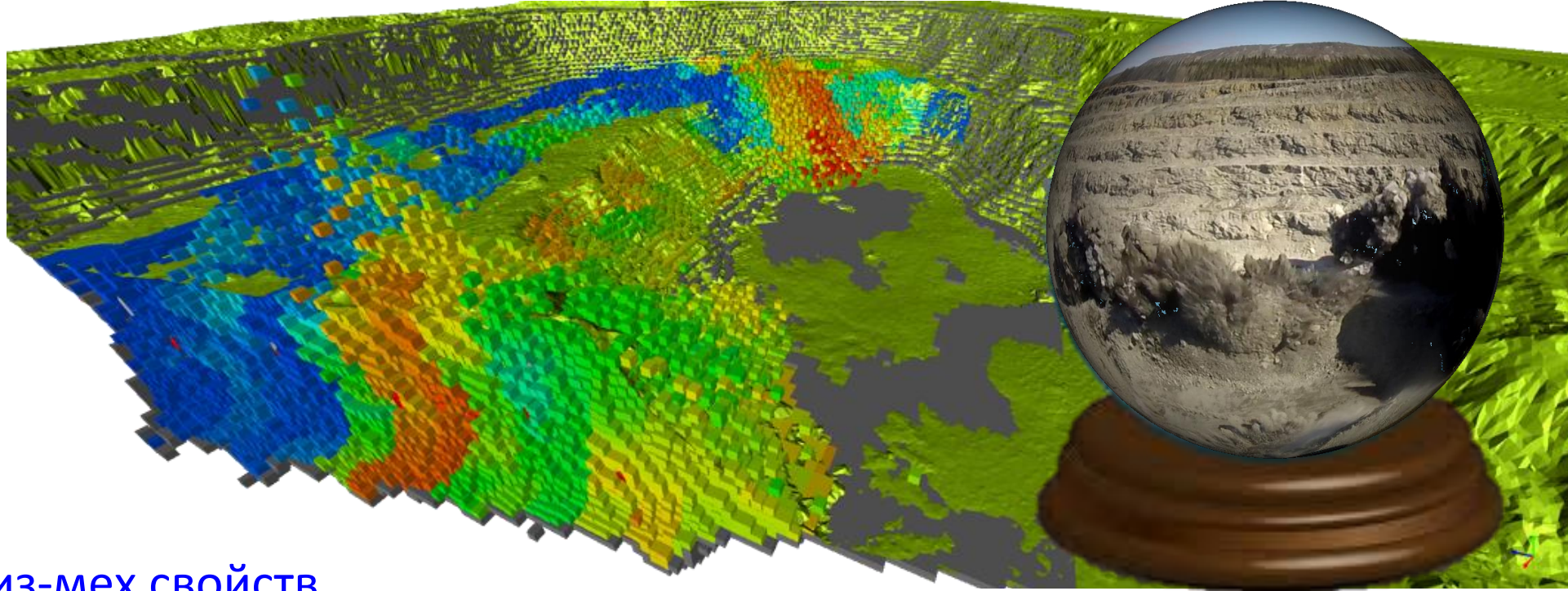


- Качественное распределение в развале
- Форма развала и ее расположение («положить развал»)
- Фрагментация развала
- Проработка подошвы и линии отрыва
- Отсутствие негабаритов
- Найти лучшее соотношение взрыва «цена-качество»

Взрыв с
управляемыми
параметрами



Программное обеспечение I-Blast: реалистичное 4D моделированием взрыва



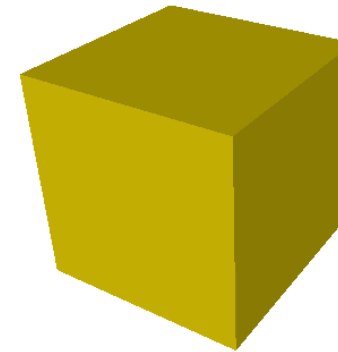
- Учёт физ-мех свойств
- Адаптация к любой конфигурации
- 4D результаты (3D + время)
- Количественные результаты
- Обоснование результатов расчетов

- Требование к точности данных

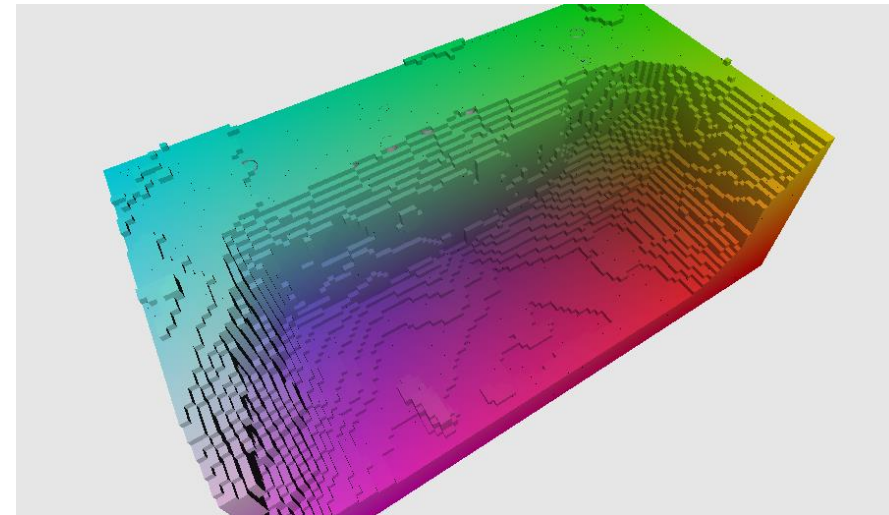
Принцип модели : дискретная модель



- Горная масса
=> воксельная
модель



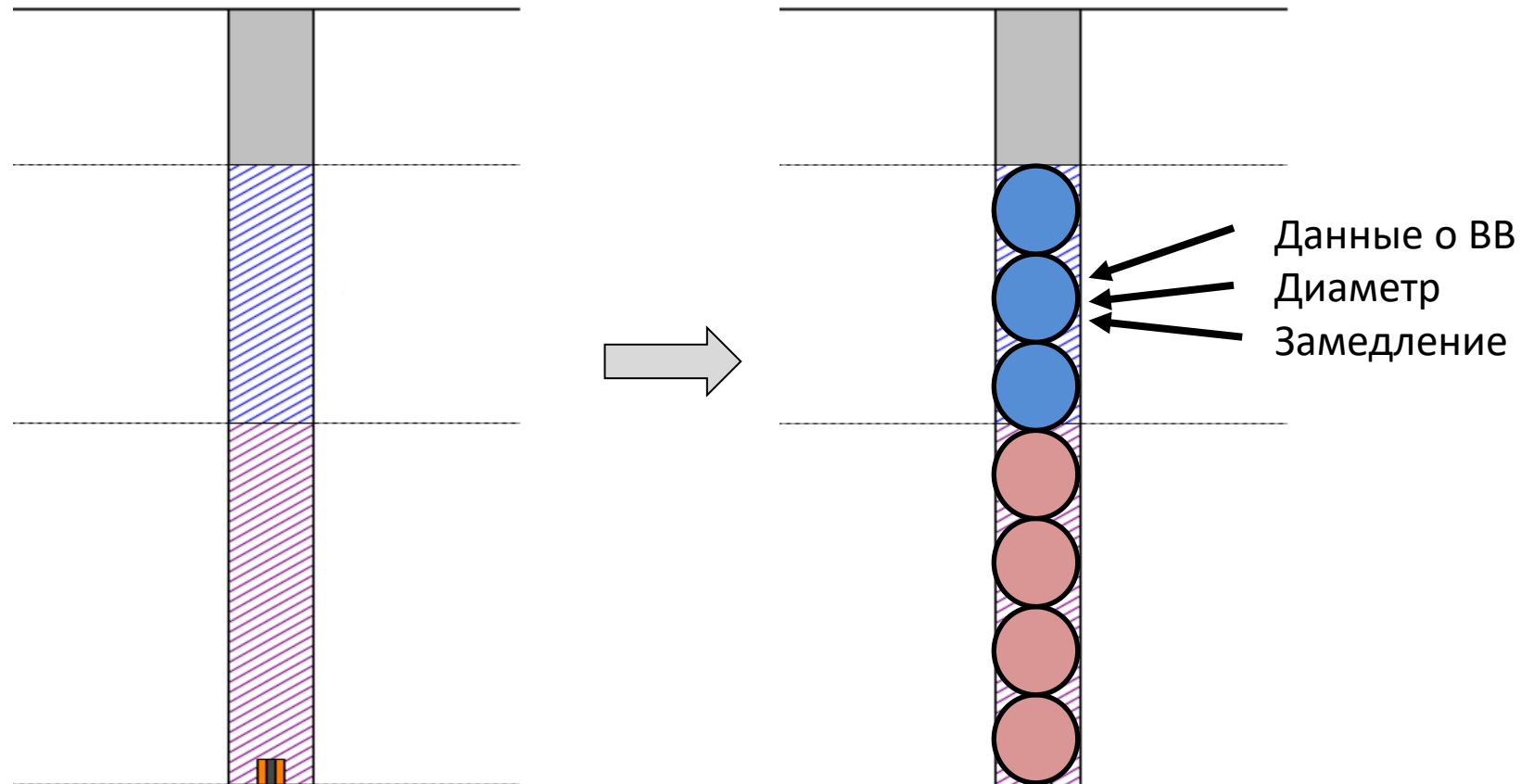
- ← Геологические данные
- ← Геомеханические данные
- ← Другие данные



Принцип модели : дискретная модель



Модель представлена в виде упругих сфер

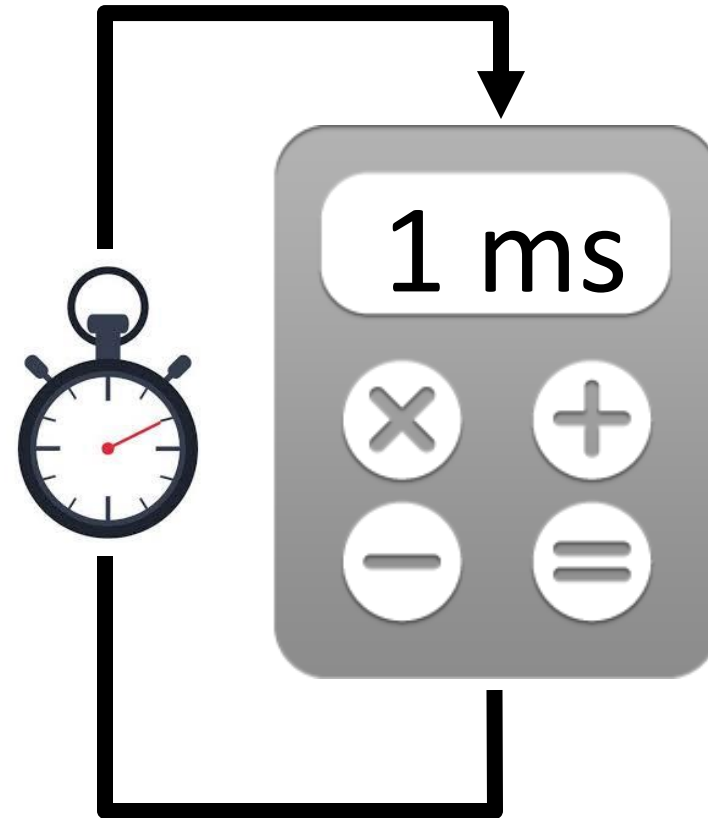


Принцип модели : дискретная модель

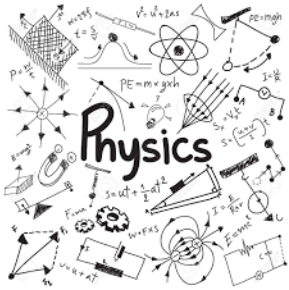


- Время

=> отрезок
времени



Принцип модели : дискретная модель



- Численный метод расчета
Генетический алгоритм



- Детонация
- Фрагментация
- Скорость выброса
- Поверхность обнажения
- Баллистика
- Ударное воздействие

Принцип модели : пример гена

5. Первый закон термодинамики

Количество теплоты, полученное ($Q > 0$) или отданное ($Q < 0$) системой.

(Энергия, полученная или отданная системой в процессе теплопередачи, т. е. при обмене энергиями между молекулами — на микроскопическом уровне.)

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \Rightarrow Q = C\Delta T$$

Теплоемкость тела (системы)

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \Rightarrow Q = cm\Delta T$$

Удельная теплоемкость вещества

$$C_M = \frac{Q}{\nu\Delta T} \Rightarrow Q = C_M\nu\Delta T$$

Молярная теплоемкость вещества

$$\text{При } V = \text{const: } C_V = \frac{\Delta U}{\Delta T}$$

При $p = \text{const}$:

$$C_p = \frac{\Delta U + A}{\Delta T} > C_V$$

6. Адиабатический процесс

$$Q = 0 \Rightarrow A_{\text{газа}} = -\Delta U$$

В теплоизолированной системе или при быстрых процессах

При адиабатическом расширении ($A_{\text{газа}} > 0$) газ охлаждается ($\Delta U < 0$)
При адиабатическом сжатии ($A_{\text{газа}} < 0$) газ нагревается ($\Delta U > 0$)
Адиабата — гипербола, идущая более "круто" чем изотермы (с ростом V убывает T).

Изотермы

7. КПД циклического процесса (теплового двигателя)

Работа газа

$$Q = \Delta U + A_{\text{газа}}$$

$$A_{\text{газа}} = -A_{\text{над газом}}$$

$$V = \text{const}$$

$$A_{\text{газа}} = 0$$

$$p = \text{const}$$

$$A_{\text{газа}} = p\Delta V = \nu R\Delta T$$

$$\nu = \text{const}$$

численно

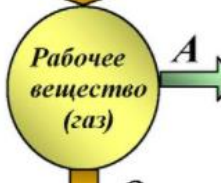
$$A_{\text{газа}} = \pm S_{\text{под граф. } p(V)}$$

"+" — если газ расширяется
"—" — если газ сжимается



Нагреватель
 $T_{\text{наг}}$

$Q_{\text{подв}}$



Изменение внутренней энергии системы

$$U = E_{\text{к тепл}} + E_{\text{р взаим}}$$

Внутренняя энергия

Кинетическая энергия хаотического движения молекул.

Потенциальная энергия взаимодействия молекул друг с другом.

В идеальном газе $E_{\text{к тепл}} \gg E_{\text{р взаим}}$, поэтому

$$U = E_{\text{к тепл}} = \frac{i}{2}pV = \frac{i}{2}\nu RT$$

$i = 3$ для одноатомных газов (He, Ne, Ar, ...)

$i = 5$ для двухатомных газов (H_2 , N_2 , O_2 , воздух, ...)

$i = 6$ для многоатомных газов (пары H_2O , ...)

$$\Delta U = \frac{i}{2}(p_2V_2 - p_1V_1) = \frac{i}{2}\nu R\Delta T$$

Для идеального газа

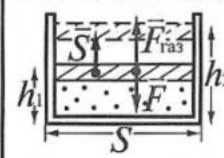
$$\Delta U = C_V\Delta T = c_V m\Delta T = C_{MV}\nu\Delta T$$

Для идеального газа в любом процессе

РАБОТА В ТЕРМОДИНАМИКЕ

1) При совершении работы газом (над газом) всегда изменяется его объем
 $\Delta V = V_2 - V_1$

Расширение газа



$$A = F \cdot S \cdot \cos\alpha$$

$$P = \frac{F}{S}$$

Работа газа (A')

$$A' = F_{\text{газ}}(h_2 - h_1) \cos 0^\circ$$

$$A' = p \cdot S(h_2 - h_1) \cdot 1$$

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$$

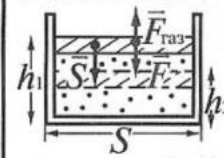
Работа над газом (A)

$$A = F(h_2 - h_1) \cos 180^\circ$$

$$A = p \cdot S(h_2 - h_1) \cdot (-1)$$

$$A = -p(V_2 - V_1) = -p\Delta V$$

Сжатие газа



$$A = F \cdot S \cdot \cos\alpha$$

$$P = \frac{F}{S}$$

Работа газа (A')

$$A' = F_{\text{газ}}(h_1 - h_2) \cos 180^\circ$$

$$A' = p \cdot S(h_1 - h_2) \cdot (-1)$$

$$A' = -p(V_1 - V_2) = -p\Delta V$$

Работа над газом (A)

$$A = F(h_1 - h_2) \cos 0^\circ$$

$$A = p \cdot S(h_1 - h_2) \cdot 1$$

$$A = p(V_1 - V_2) = p\Delta V$$

для $p = \text{const}$

$$A = p(V_2 - V_1)$$

$$A = p\Delta V$$

$$A' = -A$$

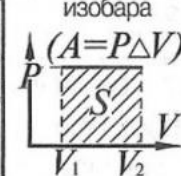
если $\Delta V = 0$

$$A = A' = 0$$

$$A = p\Delta V = \frac{m}{\mu}R\Delta T$$

2) Геометрическое истолкование

Работа в термодинамике численно равна площади фигуры под графиком $P(V)$



Уравнения механики сплошных сред

После подстановки (8) в (7) уравнение движения сплошной среды в векторной форме примет вид

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\nabla \mathbf{v})\mathbf{v} = \rho \mathbf{F} + \frac{\partial \tau_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z}. \quad (1.3.9)$$

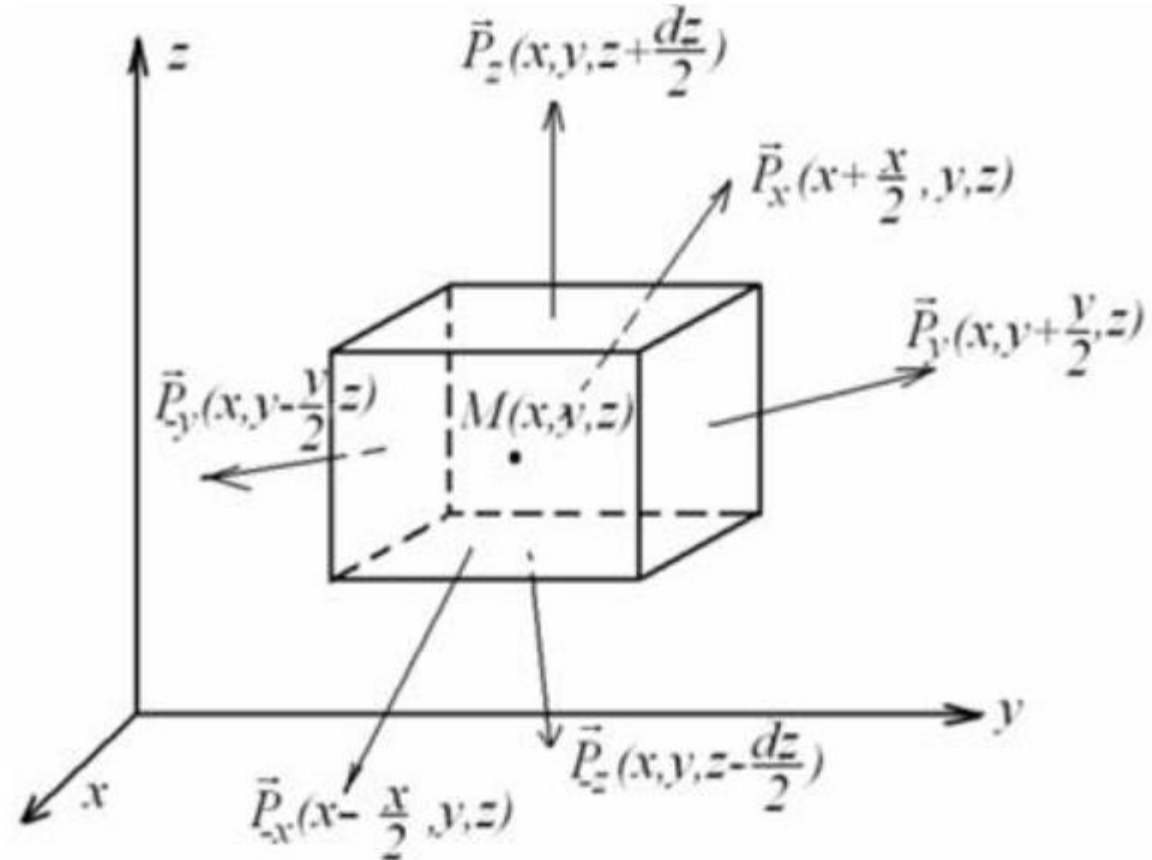
В проекциях на оси координат векторное уравнение (9) запишется в виде системы трех уравнений

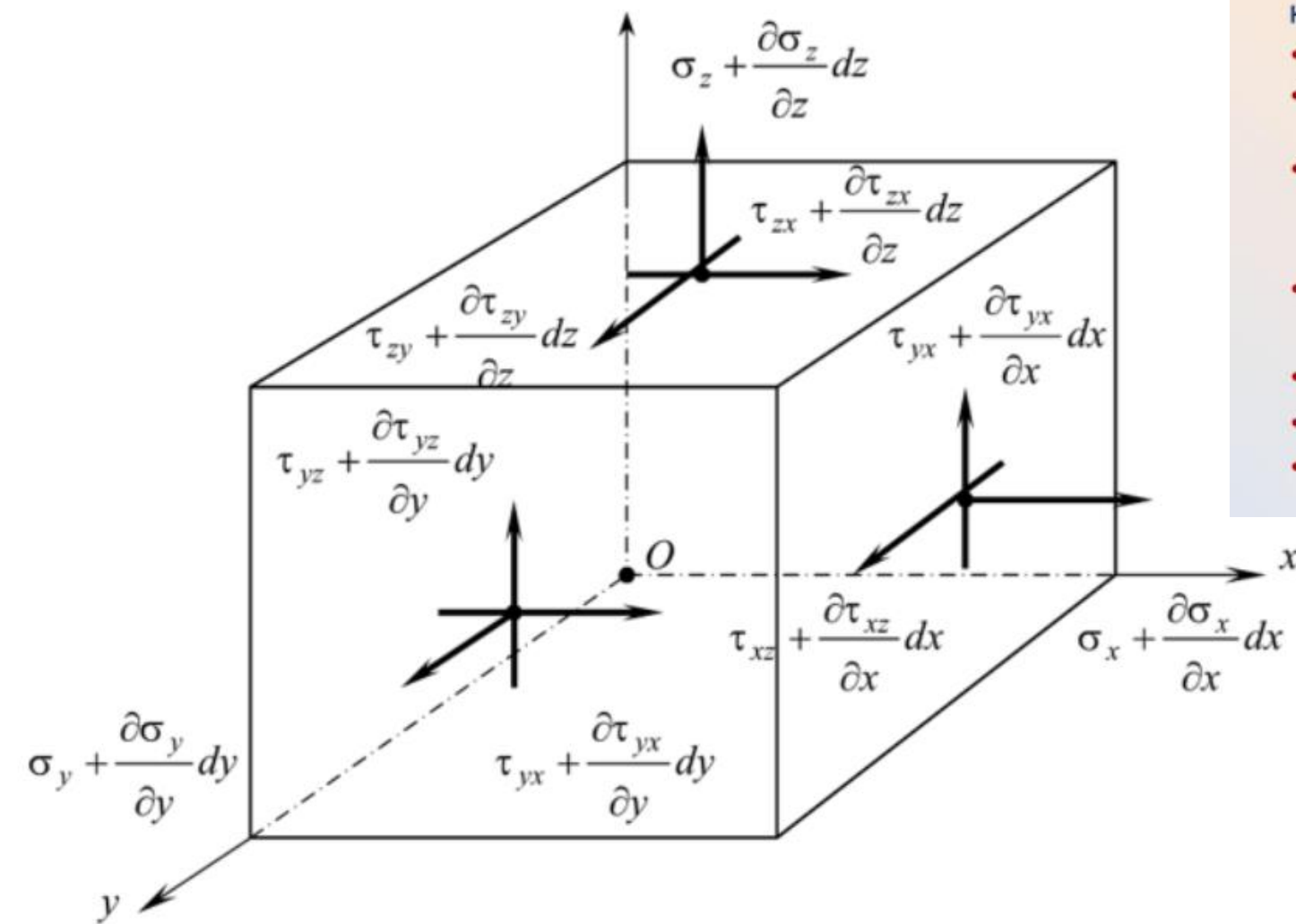
$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_x}{\partial z} v_z &= F_x + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_y}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_y}{\partial z} v_z &= F_y + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial v_z}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_z}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_z}{\partial z} v_z &= F_z + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (1.3.10)$$

где проекции векторов напряжений из уравнения (9) на оси координат соответственно равны

$$\begin{aligned} \tau_x &= \tau_{xx}\mathbf{i} + \tau_{xy}\mathbf{j} + \tau_{xz}\mathbf{k}, \\ \tau_y &= \tau_{yx}\mathbf{i} + \tau_{yy}\mathbf{j} + \tau_{yz}\mathbf{k}, \\ \tau_z &= \tau_{zx}\mathbf{i} + \tau_{zy}\mathbf{j} + \tau_{zz}\mathbf{k}. \end{aligned}$$

Уравнения движения сплошной среды (10), записанные в проекциях на оси прямоугольной декартовой системы координат содержат десять неизвестных ($v_x, v_y, v_z, \tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \rho$) и не являются, таким образом, замкнутой системой уравнений для определения всех неизвестных. Для замыкания этой системы уравнений к ним добавляются уравнения, отражающие физическую сущность рассматриваемых задач. К таким уравнениям относятся уравнения «неразрывности» или «сплошности» среды и уравнения модели исследуемой среды (реологическая модель среды).





К началу XX века были созданы основы МСС:

- Понятие сплошной среды.
- Закон сохранения массы $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \mathbf{u} = 0$.
- Закон сохранения количества движения $\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla (\rho \mathbf{u}) + \rho (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} + \nabla \mathbf{P} = \frac{\partial \bar{\mathbf{s}}_k}{\partial x_k}$.
- Закон сохранения энергии $\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla (\mathbf{P} + \rho \varepsilon) \mathbf{u} = \nabla \mathbf{q} + \frac{\partial \bar{\mathbf{s}}_k \mathbf{u}}{\partial x_k}$, где $\varepsilon = E + 0,5 \mathbf{u}^2$.
- Уравнения состояния $P(\rho, E)$ или $P(\rho, T)$, $E(\rho, T)$.
- Определяющие уравнения (упругость, пластичность, вязкость).
- Инвариантность к преобразованию Галилея.

Уравнения Ламе и уравнения совместности деформаций

1.5. Уравнения Ламе

Задачи теории упругости можно непосредственно решать в перемещениях. Для этого следует записать уравнения равновесия в перемещениях. Это можно сделать, выразив компоненты тензора напряжений из (12) и подставив их в (16). Окончательные уравнения можно представить в виде

$$\begin{aligned}(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \Delta u_x + \rho X &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \\(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \Delta u_y + \rho Y &= \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \\(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \Delta u_z + \rho Z &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}\end{aligned} \quad (18)$$

Это и есть **уравнения Ламе** в теории упругости.
В векторном виде имеем

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + \mu \Delta \mathbf{u} + \rho \mathbf{F}. \quad (19)$$

Аналогичным образом в перемещениях можно представить и краевые условия.

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y},$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial y \partial z},$$

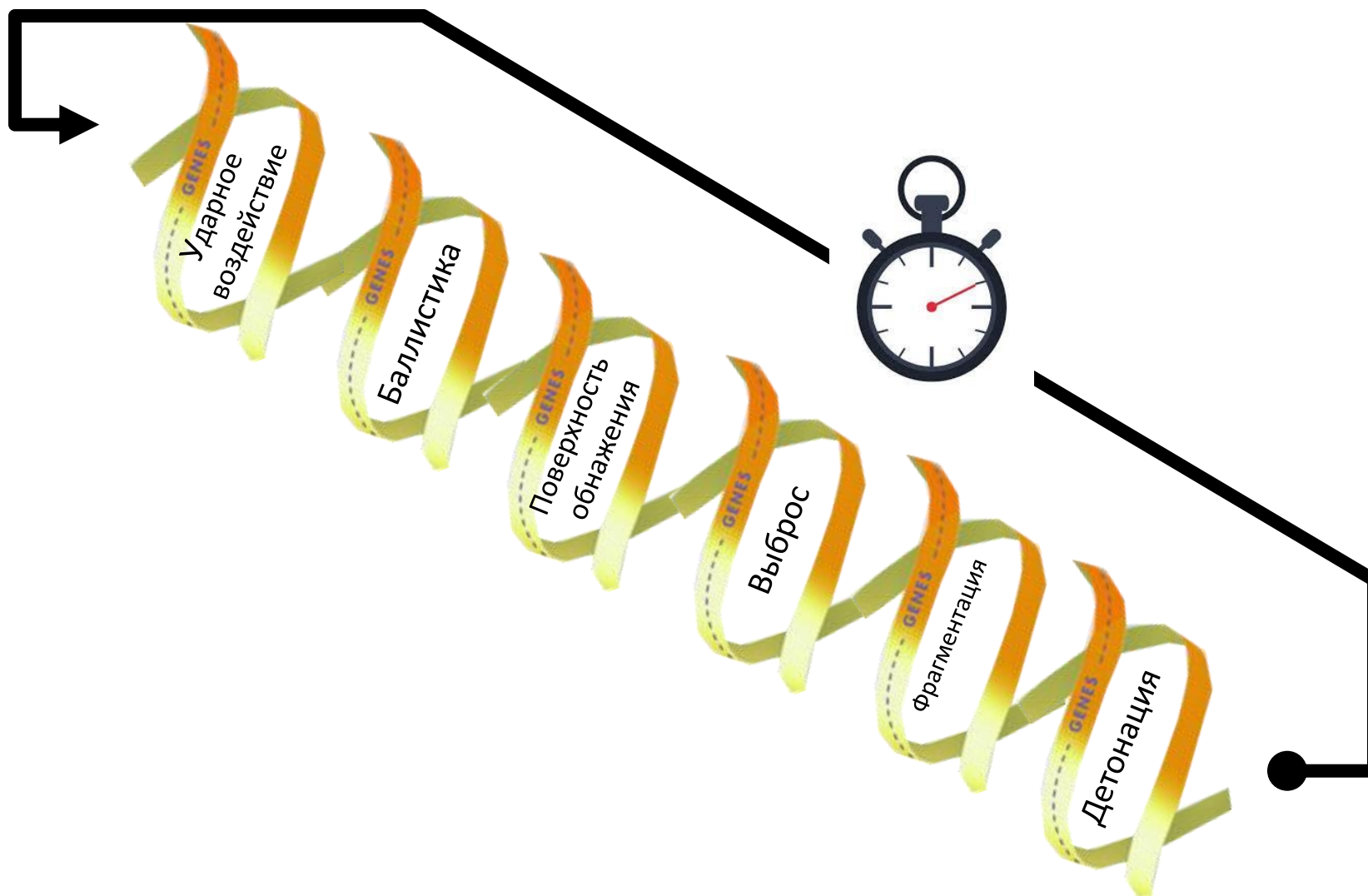
$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial z^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{zx}}{\partial z \partial x},$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x \partial y},$$

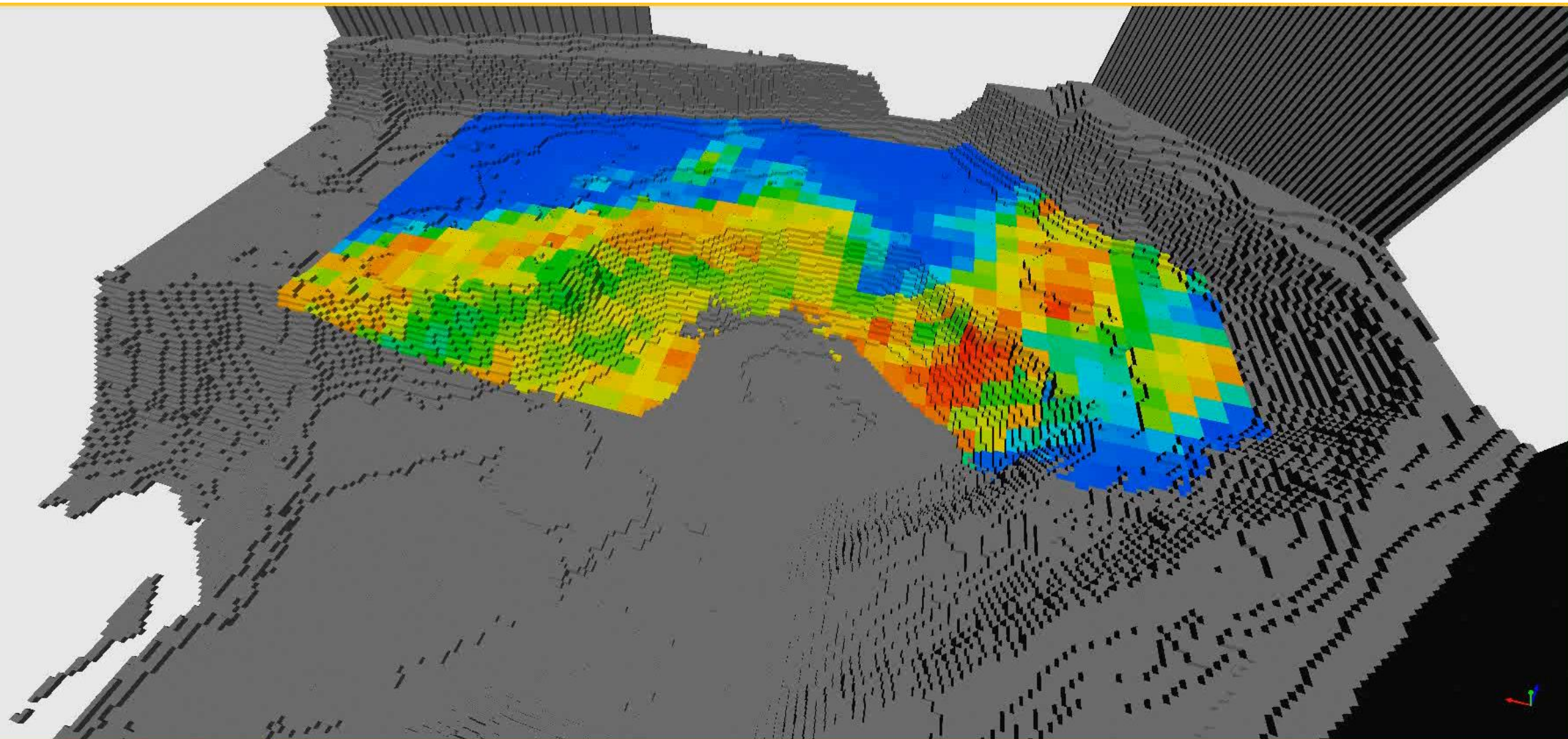
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y \partial z},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z \partial x}.$$

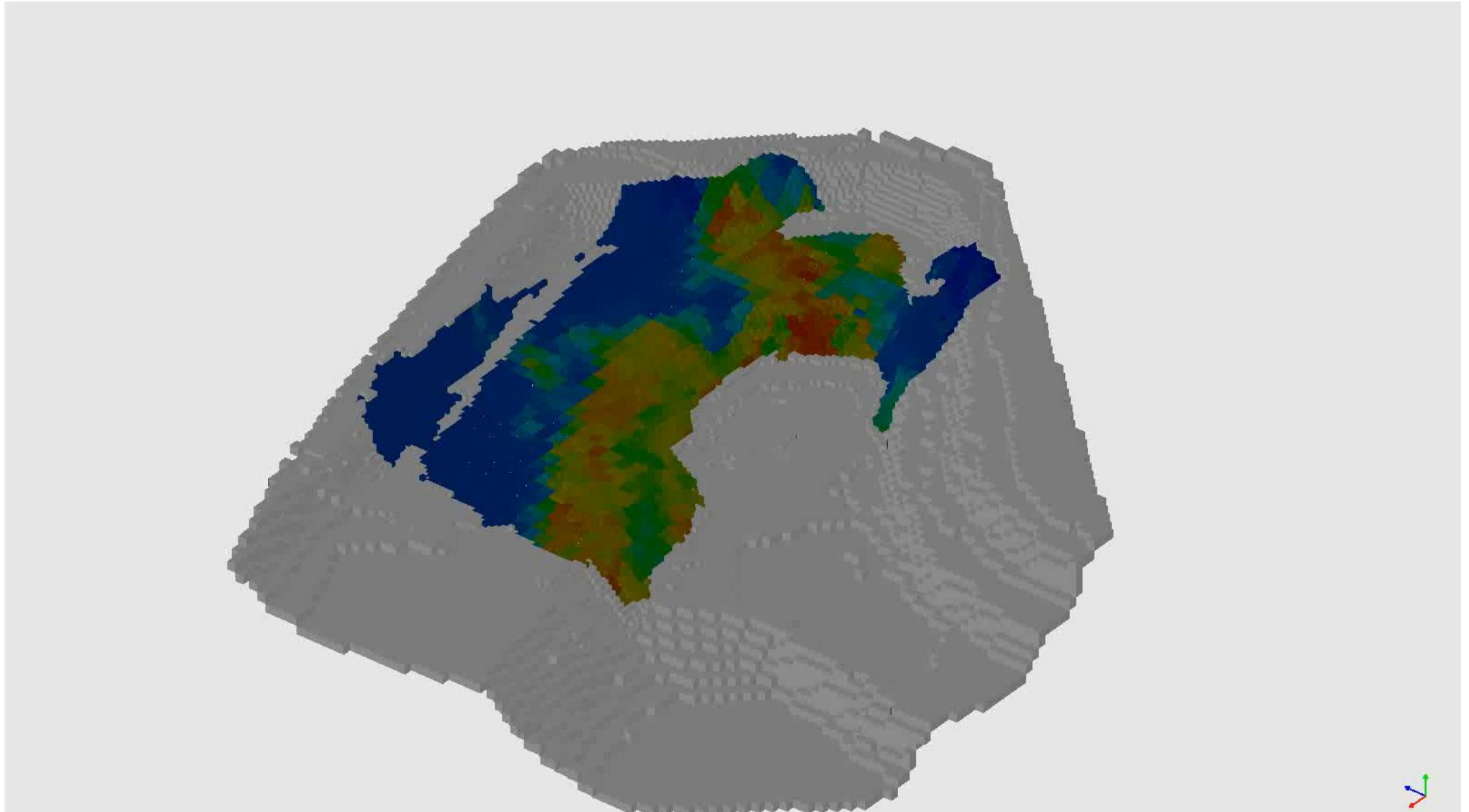
Принцип модели : итерации во времени



КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЙ



4D моделирование взрыва – разубоживание (видео)

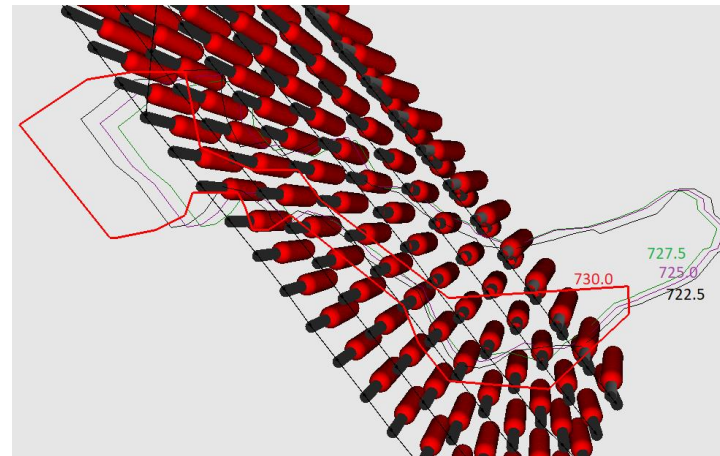
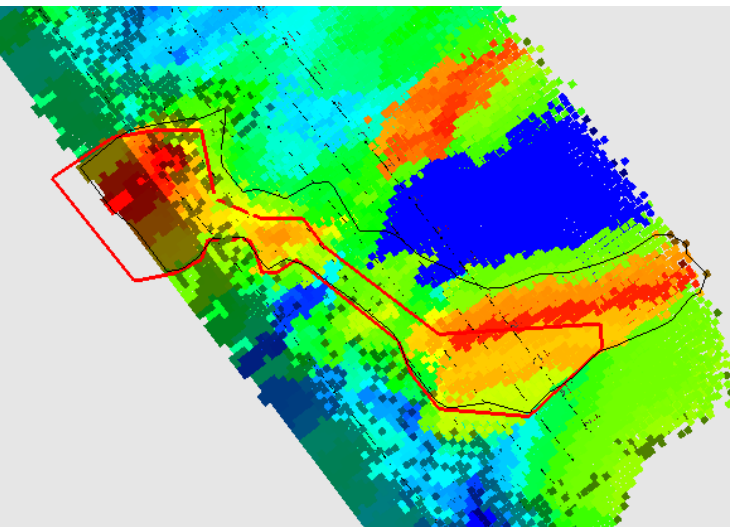
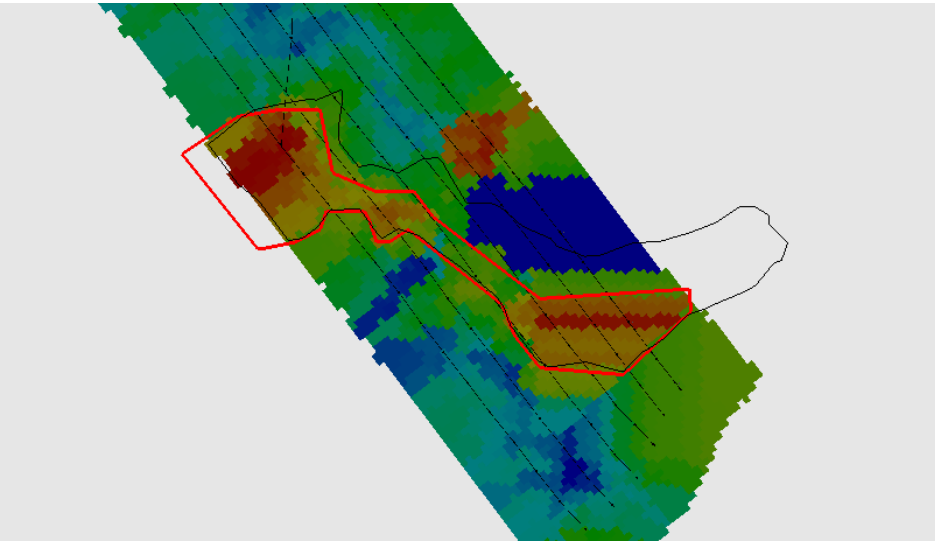


Выгоды: потери и разубоживание

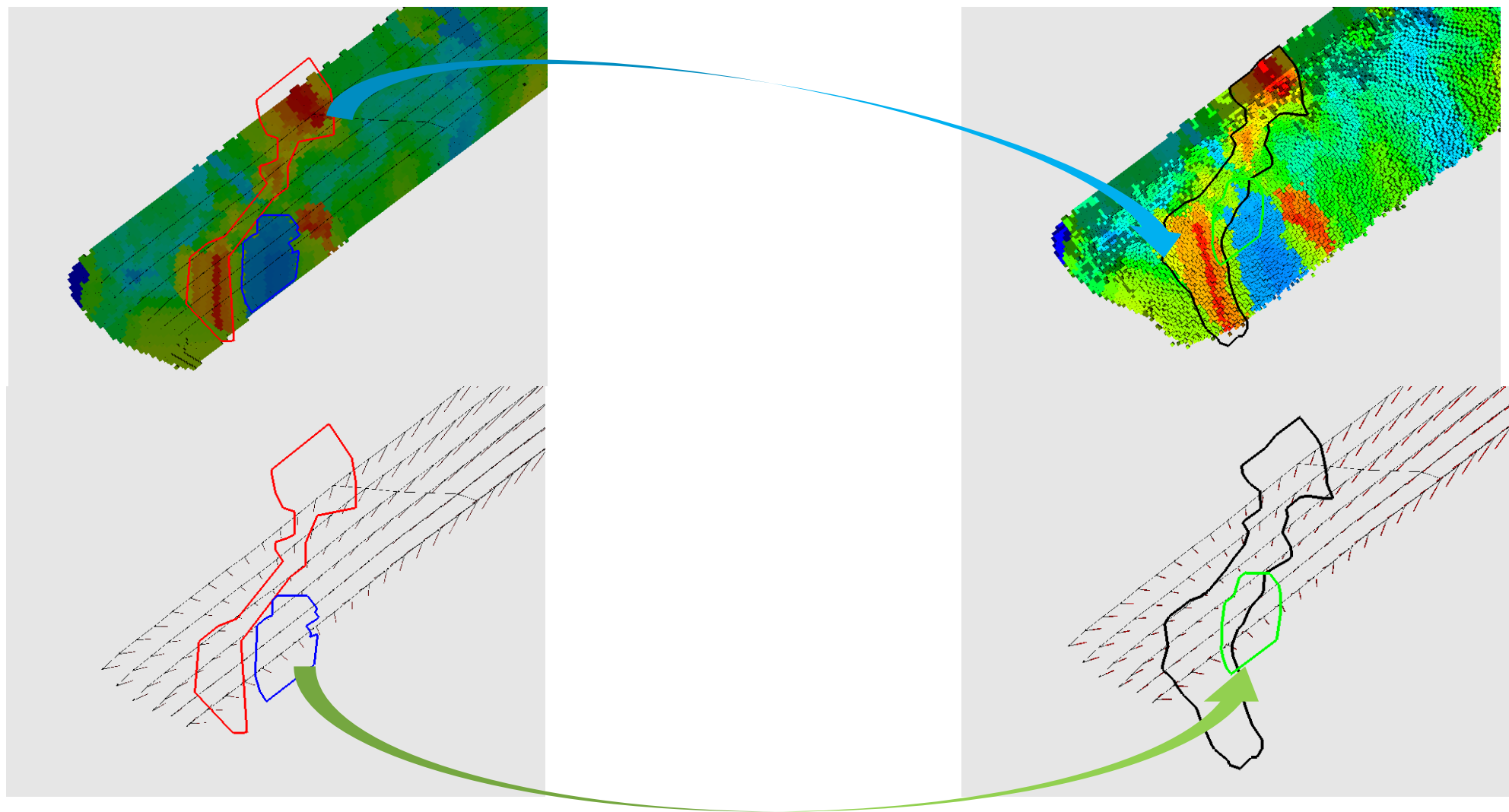
Контроль качества руды это ключ к **максимизации ценности рудного тела**

- 4D моделирование взрыва может спрогнозировать сложное перемещение взрыва:

- Преобразование **блочной модели целика** взрываемого блока в **разрыхленную после взрыва рудоконтрольную модель**
- Отображение **рудных полигонов после взрыва**



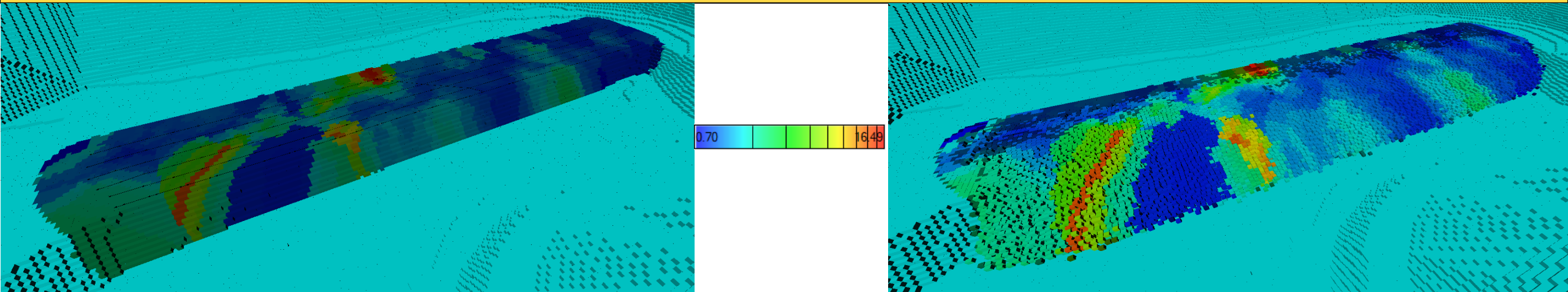
4D моделирование взрыва – потери и разубоживание





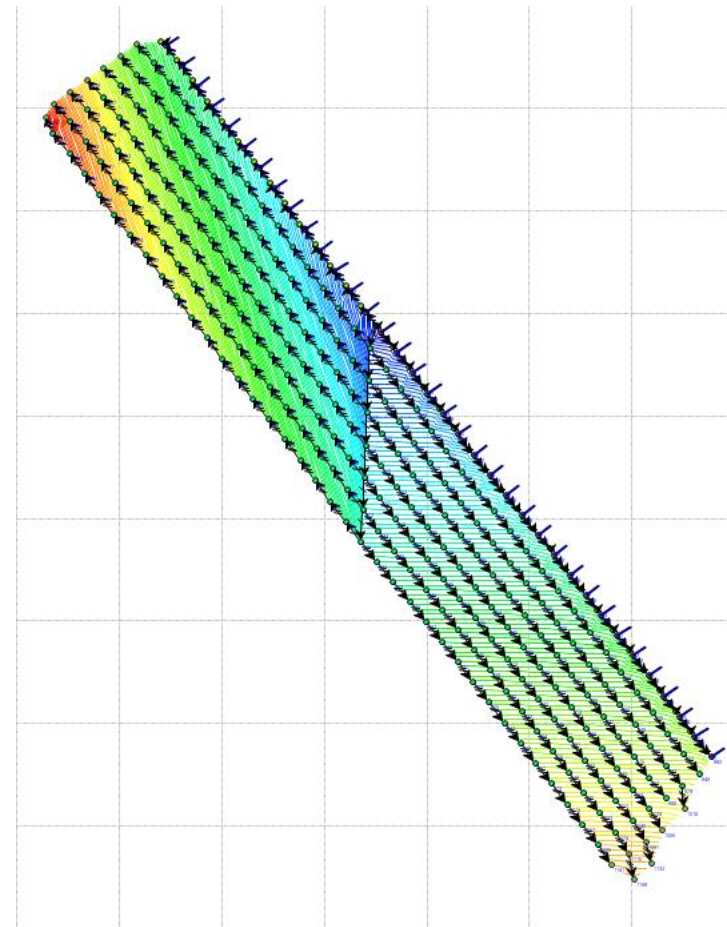
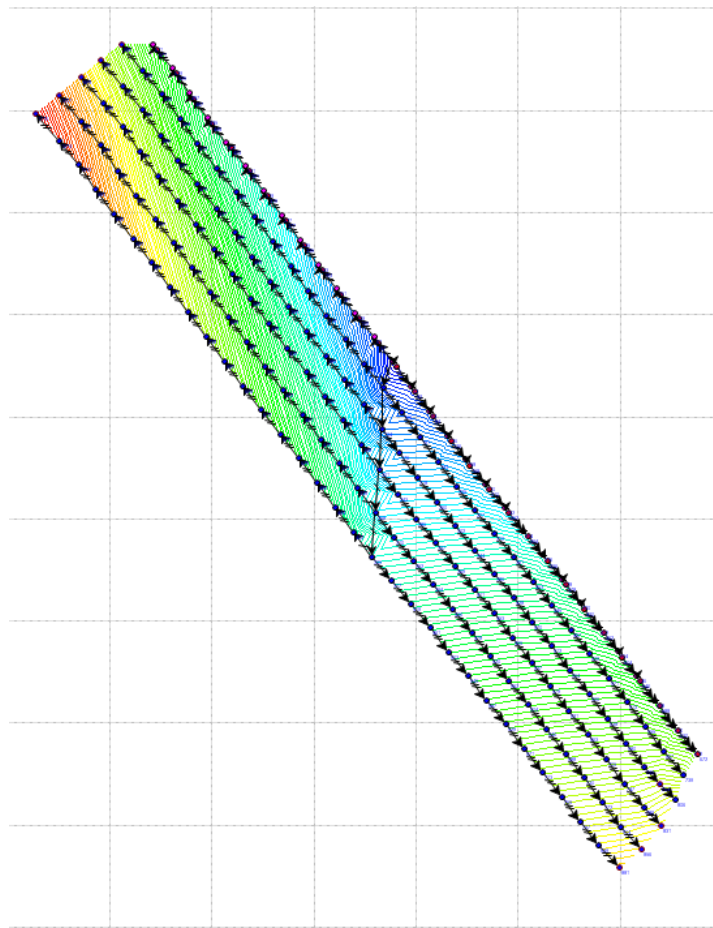
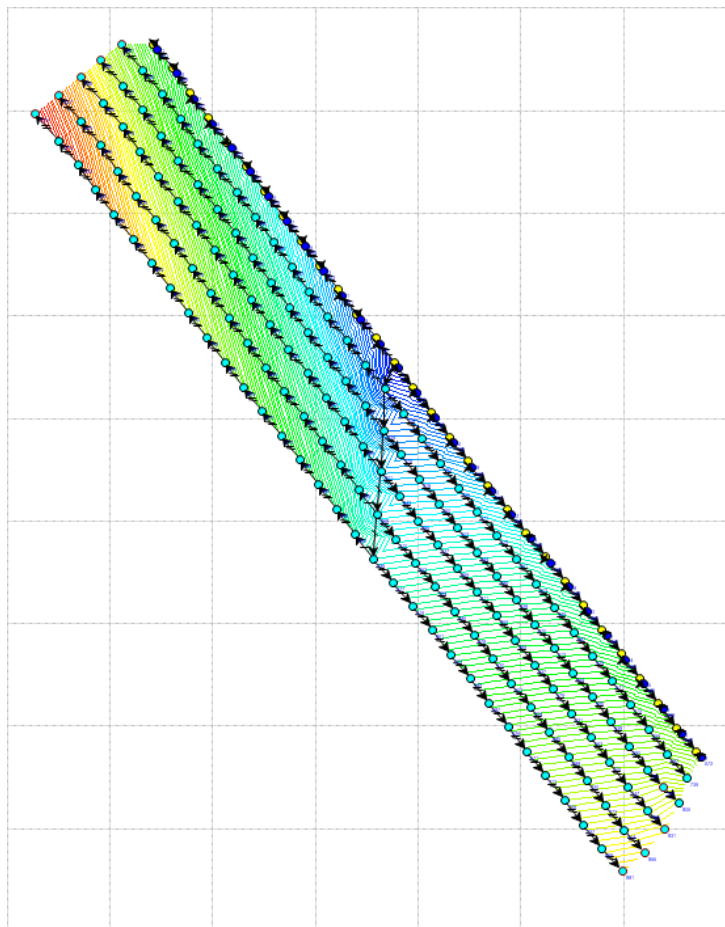
**ПРИМЕР рудника в РФ.
Добывает золото**

4D моделирование БВР



Расположение скважин и тайминг

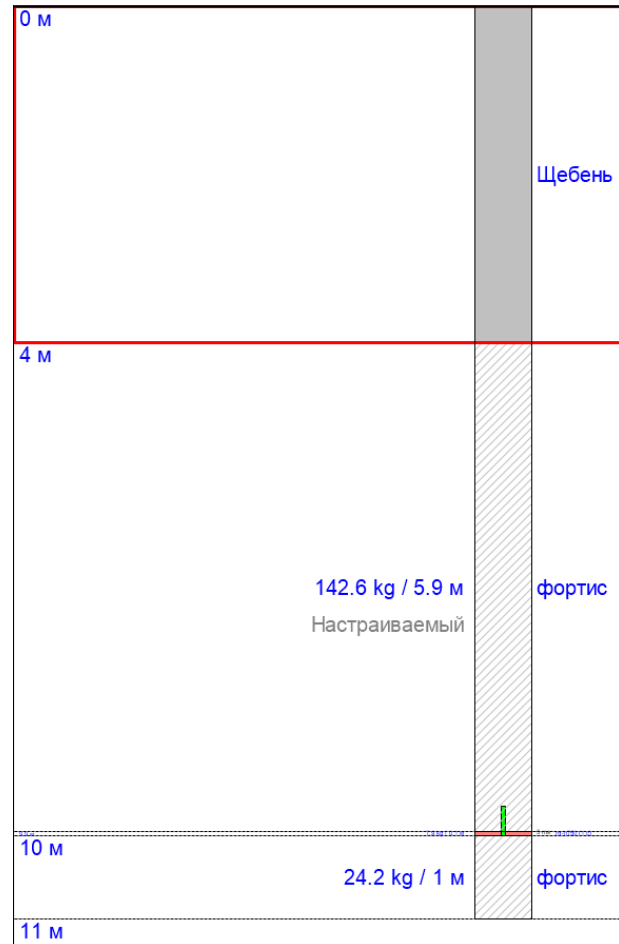
6м x 5м x 1.5м перебур диаметр 130мм



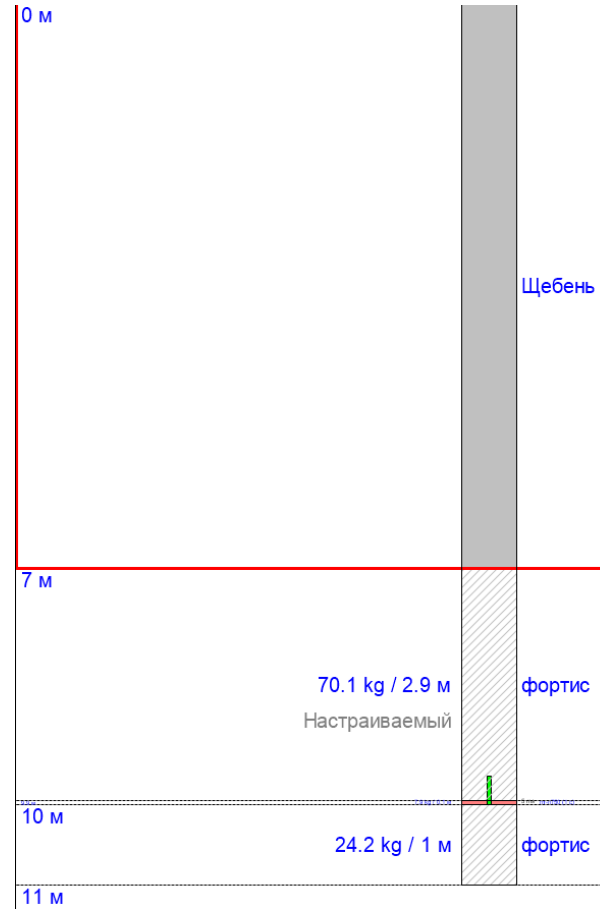
6м x 5м x 1м перебур диаметр 165мм

5м x 4м x 1м перебур диаметр 130мм

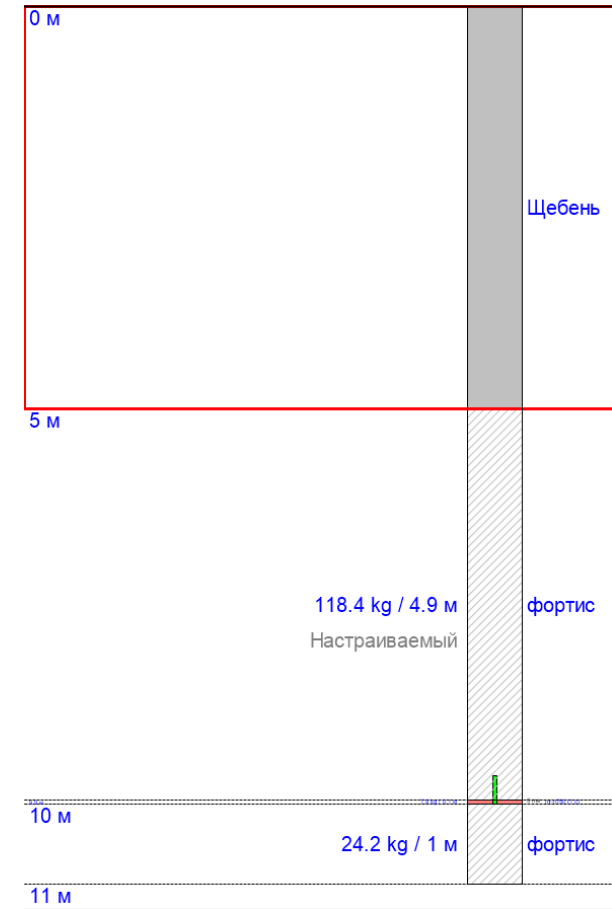
Конструкция зарядов 6м x 5м диаметр 165мм



Первый ряд

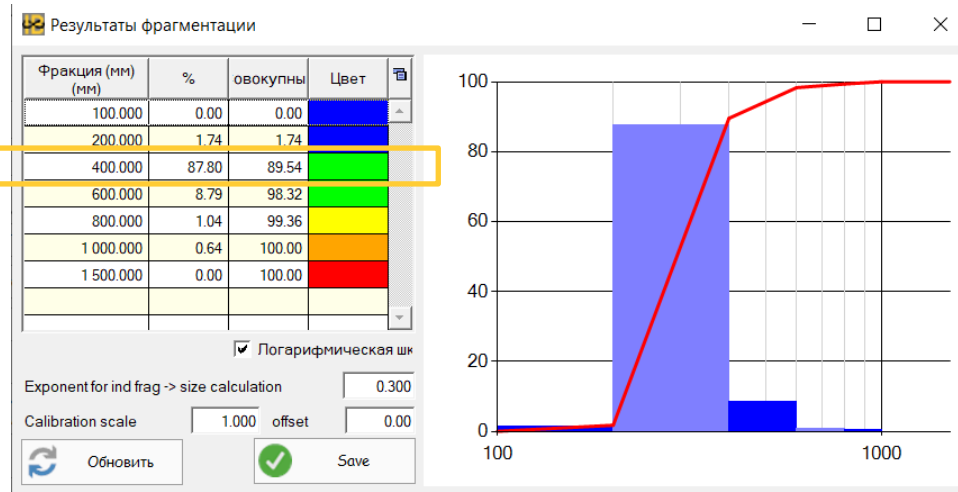


Спарка скважин

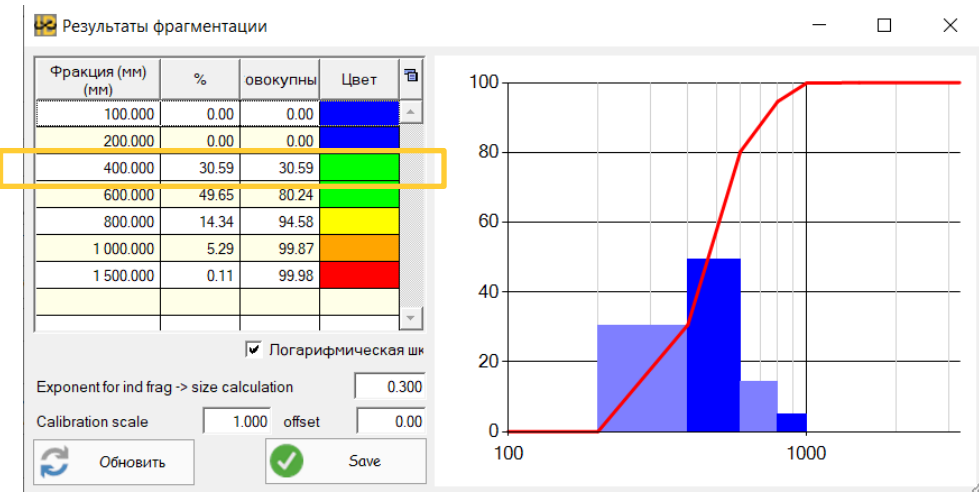


Основная конструкция

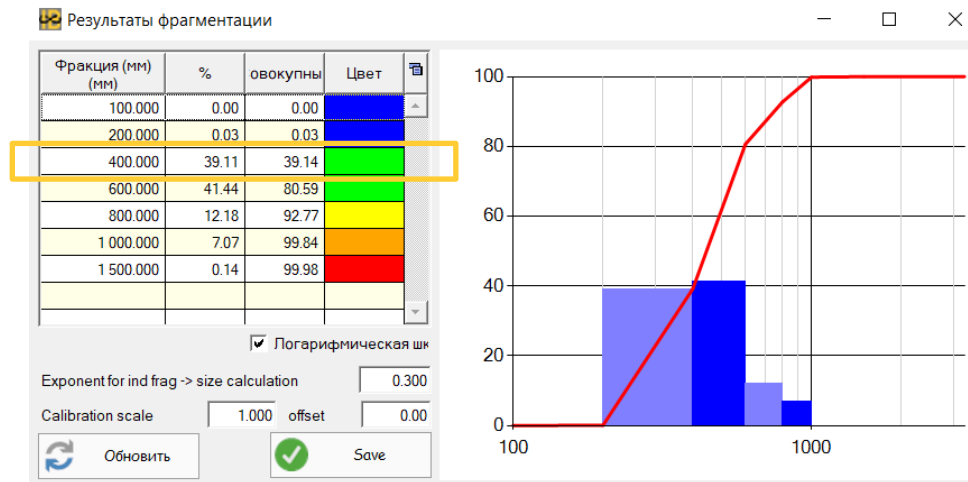
Фрагментация



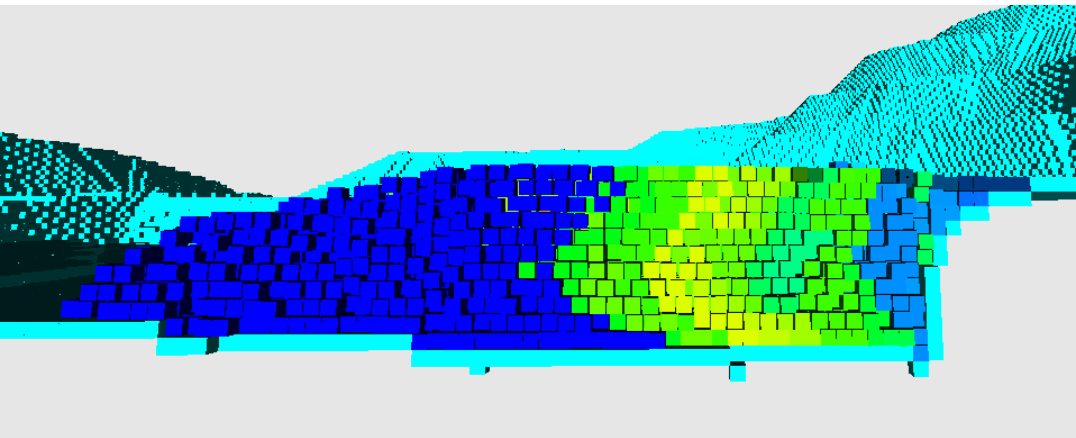
6м x 5м x 1 м перебур диаметр 165



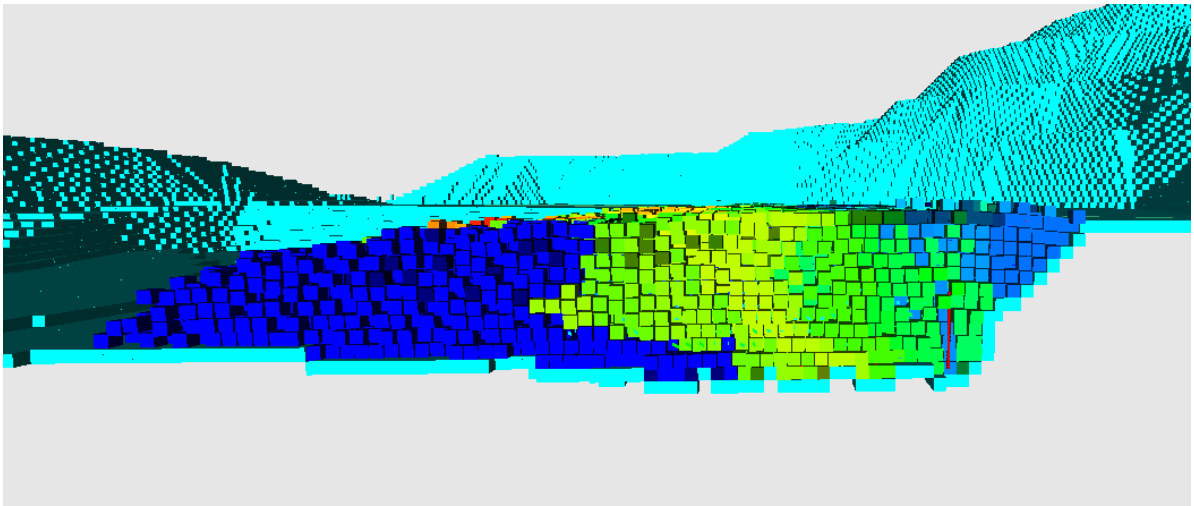
6м x 5м x 1.5 м перебур диаметр 130



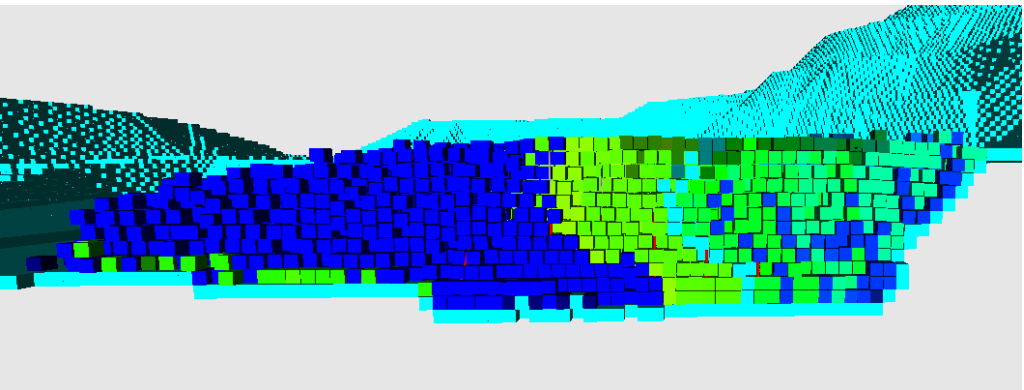
5м x 4м x 1 м перебур диаметр 130



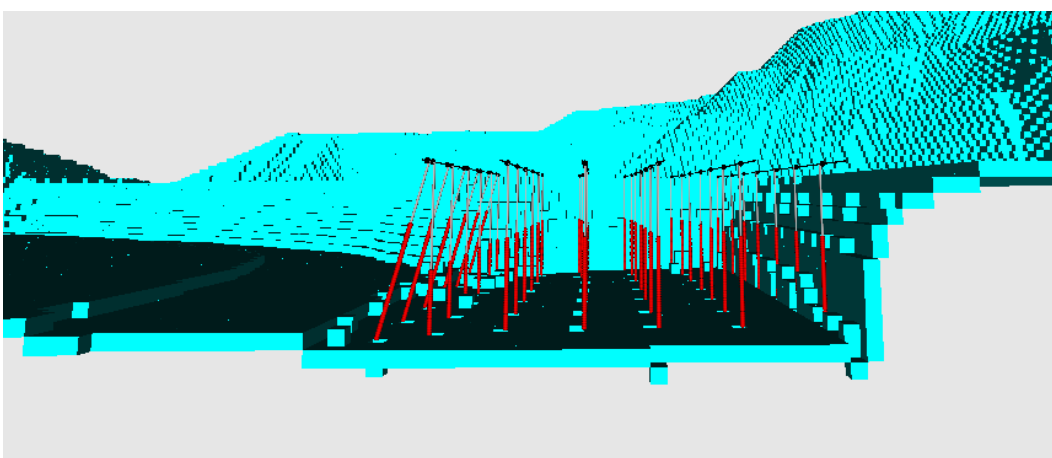
165мм 6x5 1м перебур



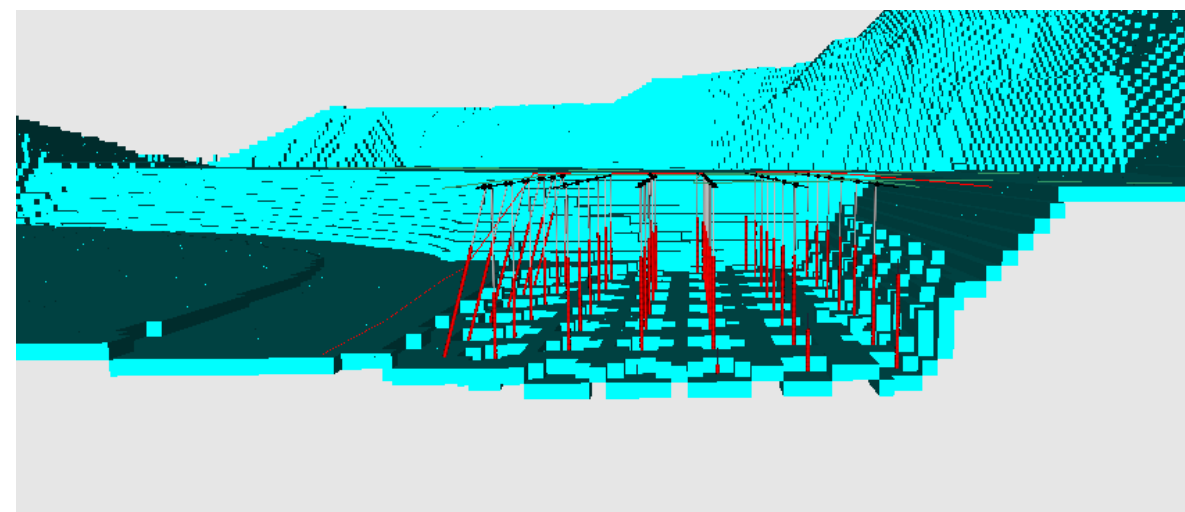
130мм 6x5 1.5м перебур



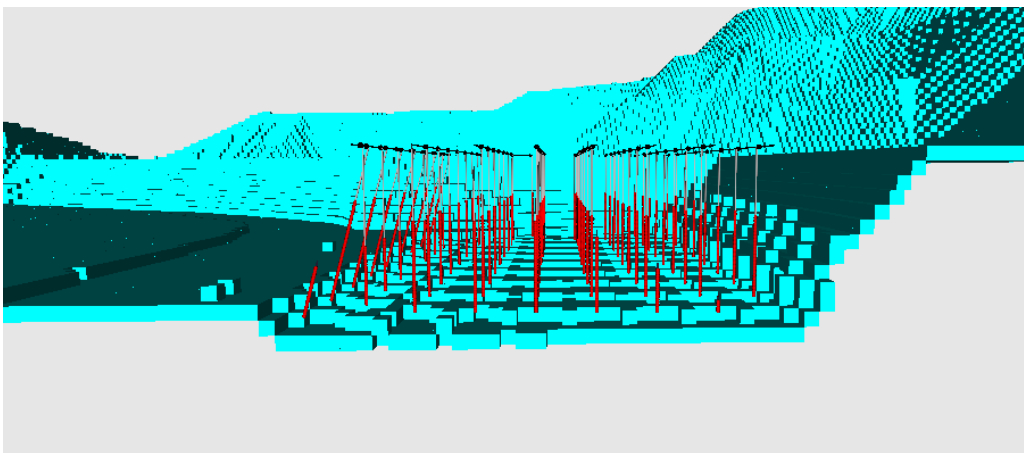
130мм 5x4 1м перебур



165мм 6x5 1м перебур

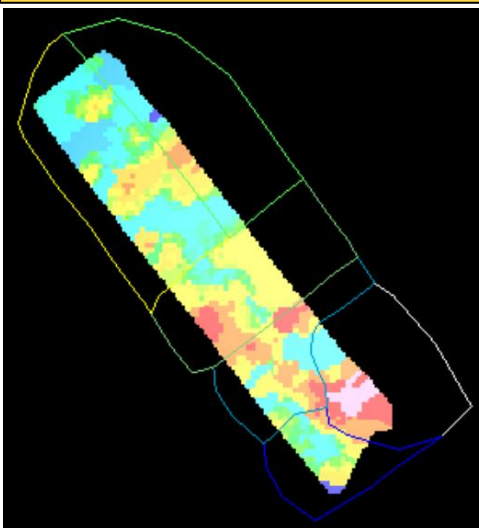


130мм 6x5 1.5м перебур

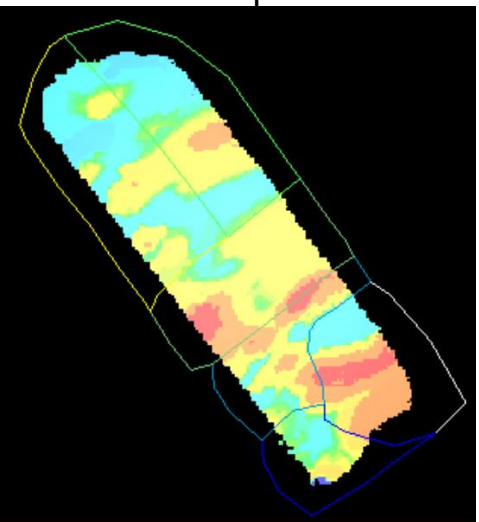


130мм 5x4 1м перебур

Распределение руды в развале по AU_US

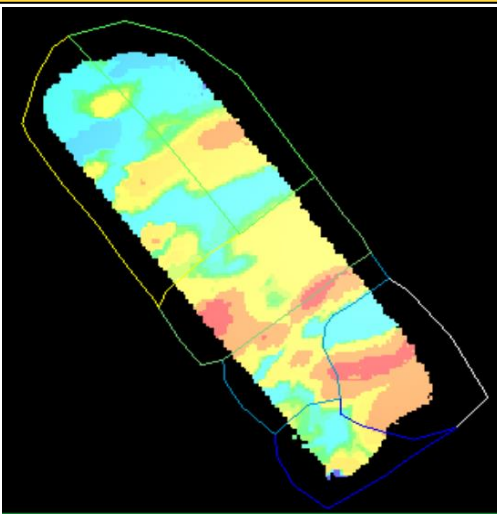


целик

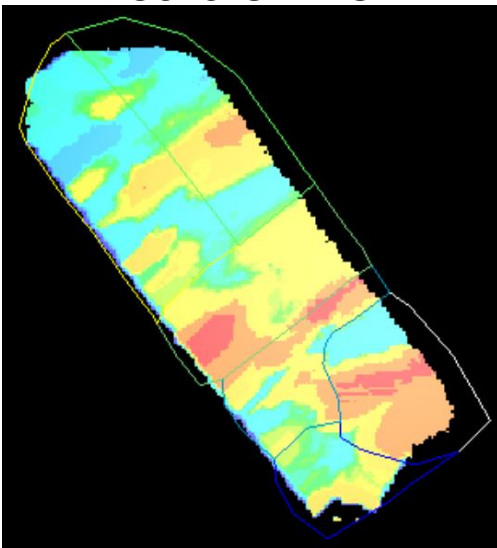


165x6x5x11

№ полигона		до взрыва*	165X(6x5)x11	130X(6x5)x11.5	130X(5x4)x11
1	Вскрыша	1034	1032	1031	1135
	Руда	4980	5578	5571	7247
	au_us	13.19	6.32	6.34	6.06
2	Вскрыша	79			192
	Руда	5173	3465	3462	6056
	au_us	2.74	2.00	1.99	2.23
3	Вскрыша	1368	67	68	183
	Руда	9291	8396	8390	10532
	au_us	5.42	4.57	4.55	4.14
4	Вскрыша				38
	Руда	12542	12060	12058	14263
	au_us	4.00	4.11	4.12	4.58
5	Вскрыша	1681	697	697	644
	Руда	2837	7949	7956	9882
	au_us	2.78	2.20	2.19	2.13
6	Вскрыша	5114	2700	2700	4796
	Руда	20540	15753	15766	19456
	au_us	2.12	1.77	1.77	1.67
Итого	au_us	4.19	3.30	3.30	3.26

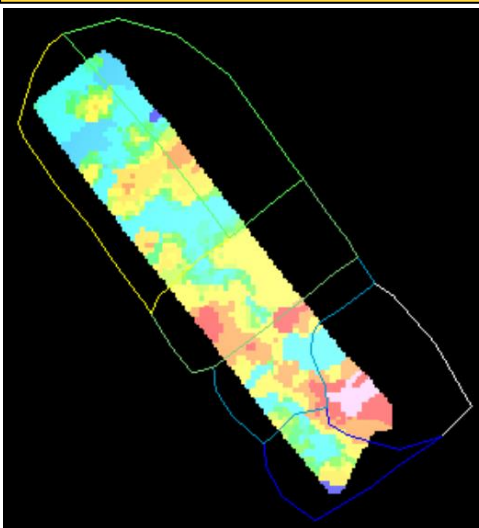


130x6x5x11.5

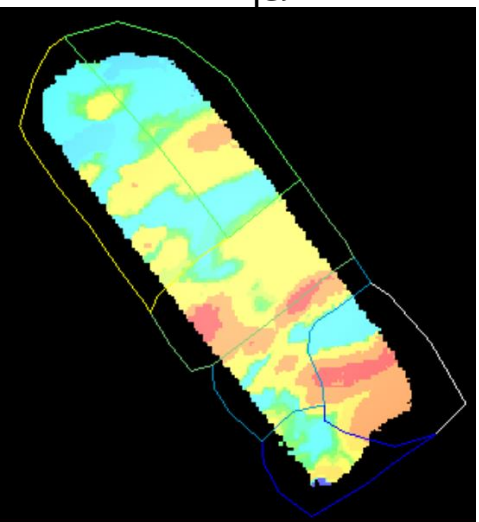


130x5x4x11

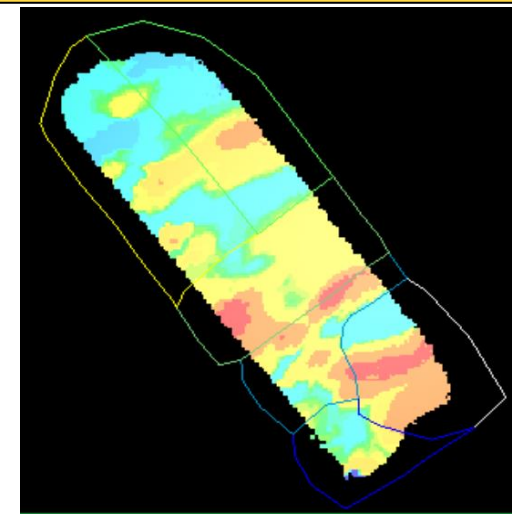
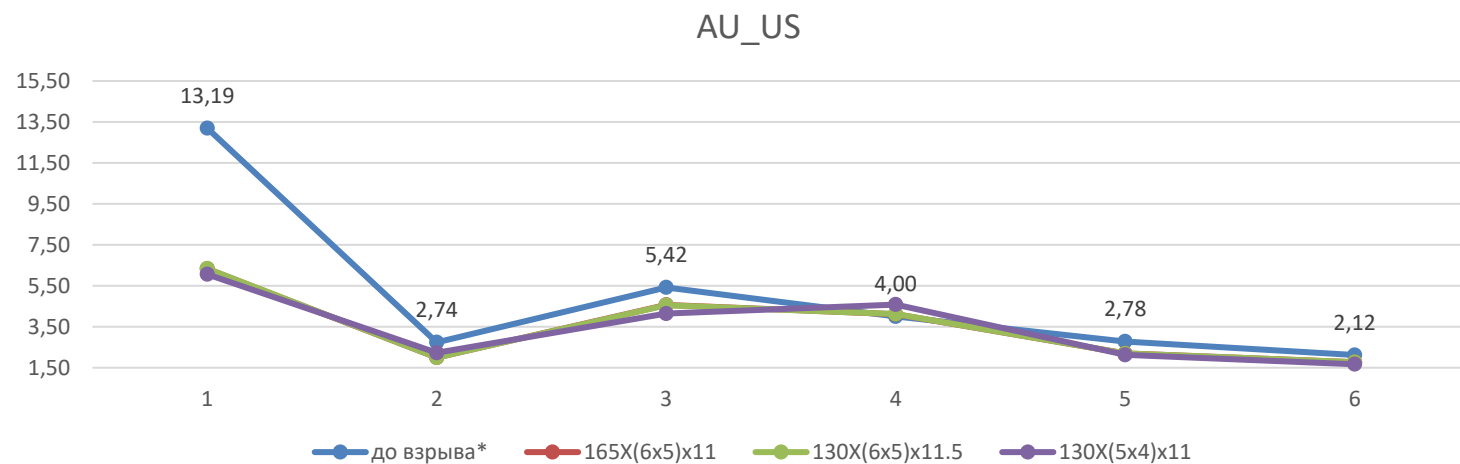
Распределение руды в развале по AU_US



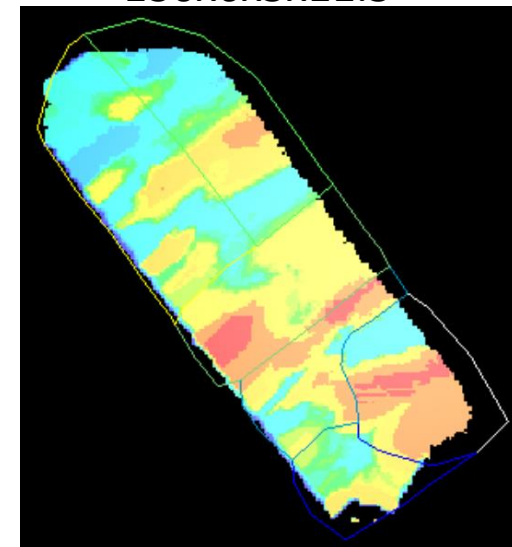
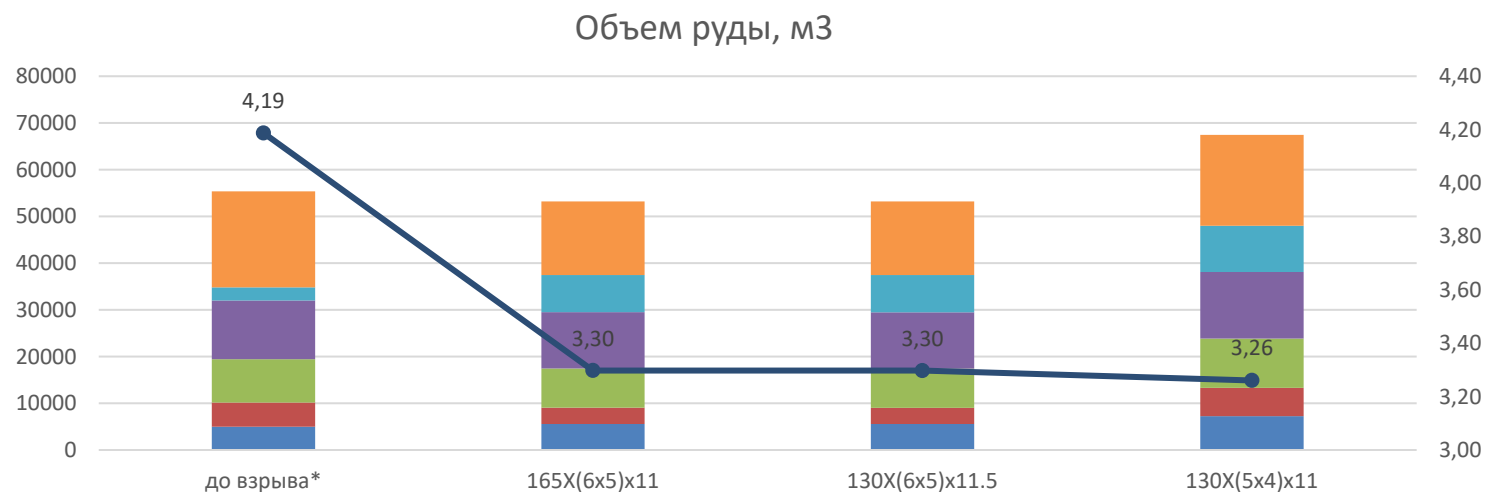
целик



165x6x5x11



130x6x5x11.5



130x5x4x11

Качество моделирования определяется качеством данных

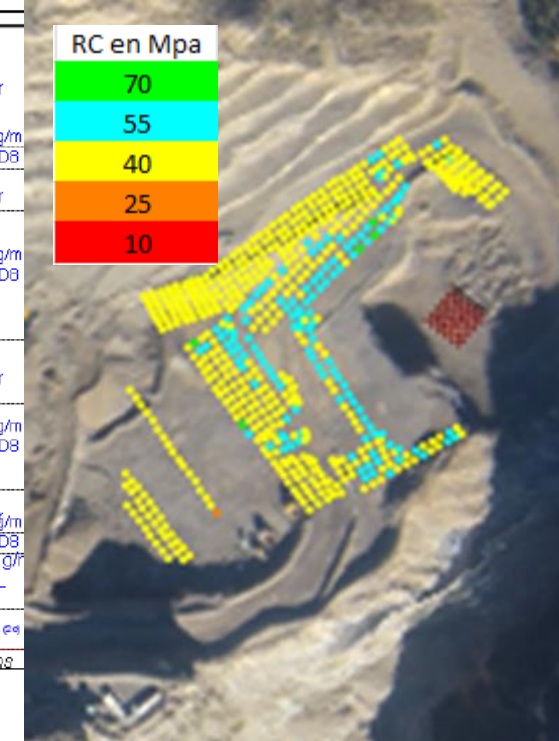
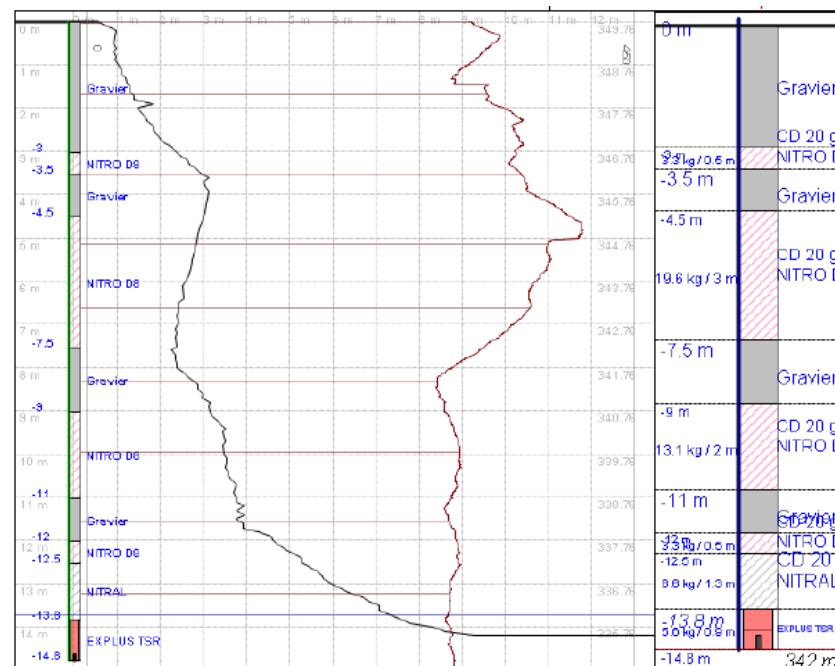
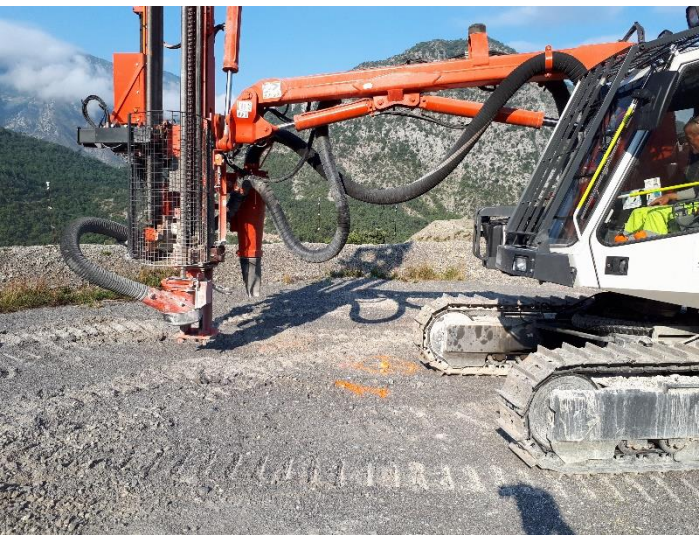


- Выбор из существующих данных (таких как качество руды, данные бурения)
 - требуется время и деньги, чтобы собрать данные, которые применимы для взрывных и добычных процессов
- Геологические данные, их сбор и обработка
 - Трудность сбора представительных данных о физико-механических свойствах пород
 - Обработка данных журналов бурения с целью определения прочности пород для наилучшего варианта:
 - конструкции скважинного заряда
 - фрагментации

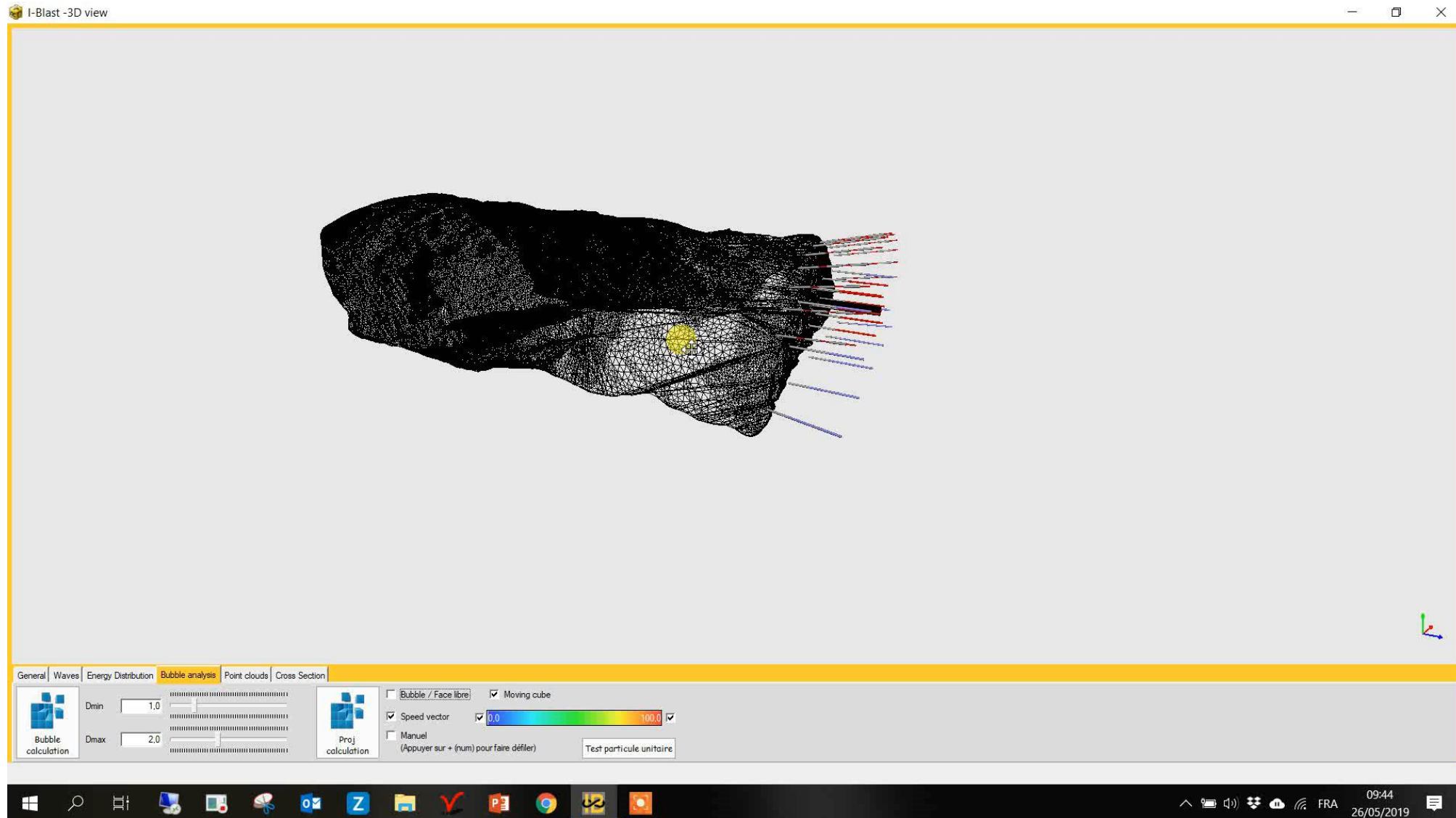


Моделирование на фактически пробуренных скважинах

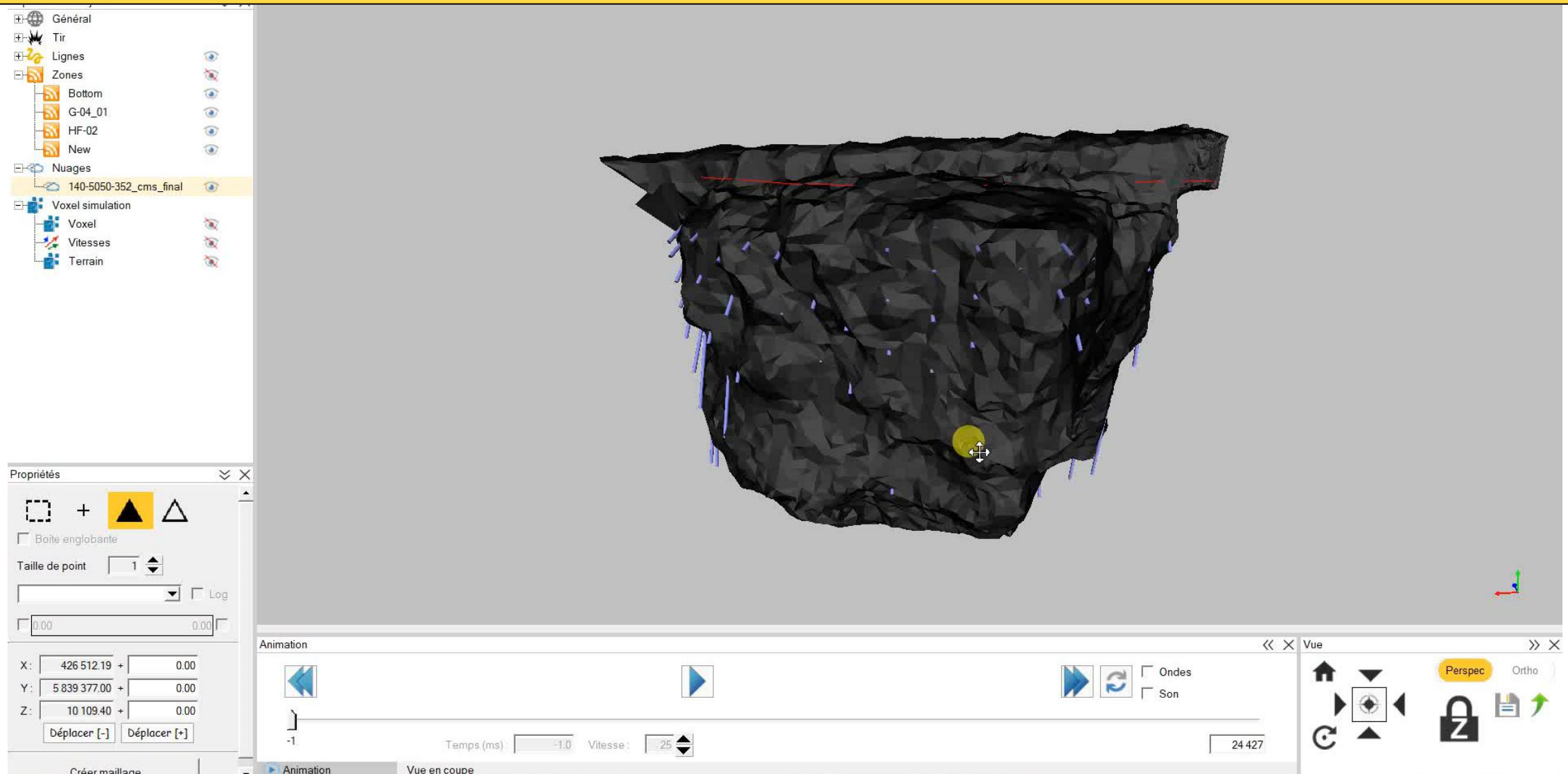
- Обработка данных журналов бурения с целью определения прочности пород для выбора наилучшего варианта :
 - конструкции скважинного заряда
 - фрагментации



4D моделирование туннельной отбойки (видео)

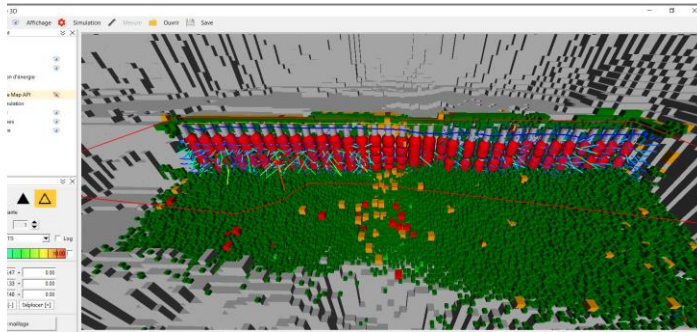


ПОДЗЕМНОЕ ВЕРНОЕ ВЗРЫВАНИЕ

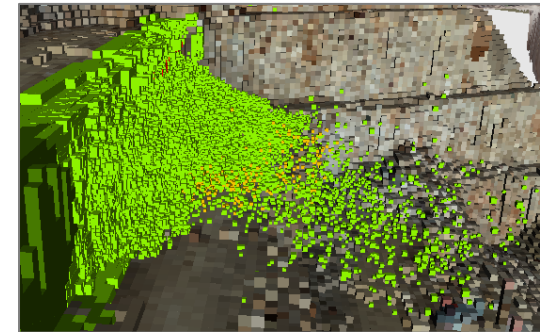


4D реалистичное моделирование взрыва

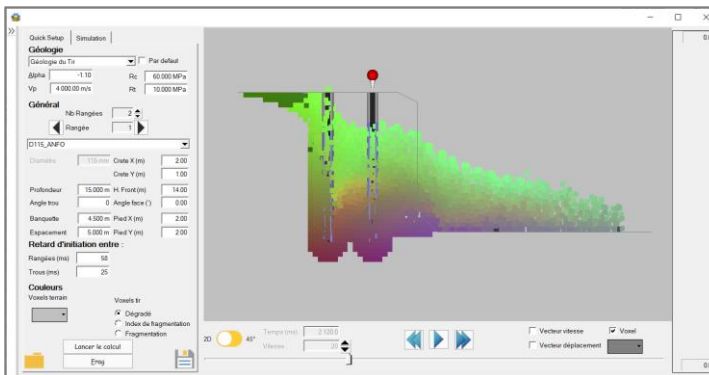
Визуализация фрагментации



Сложная геология



Калибровка развала



3D смещение полигона



ВЕРСИЯ I-BLAST 8.0

ЗАКАЗЧИКИ

Рудники



Нерудные карьеры



Производство ВВ



Строительство



Другое



[REFERENCES](#)

[CHALLENGES](#)

[CASE STUDY](#)

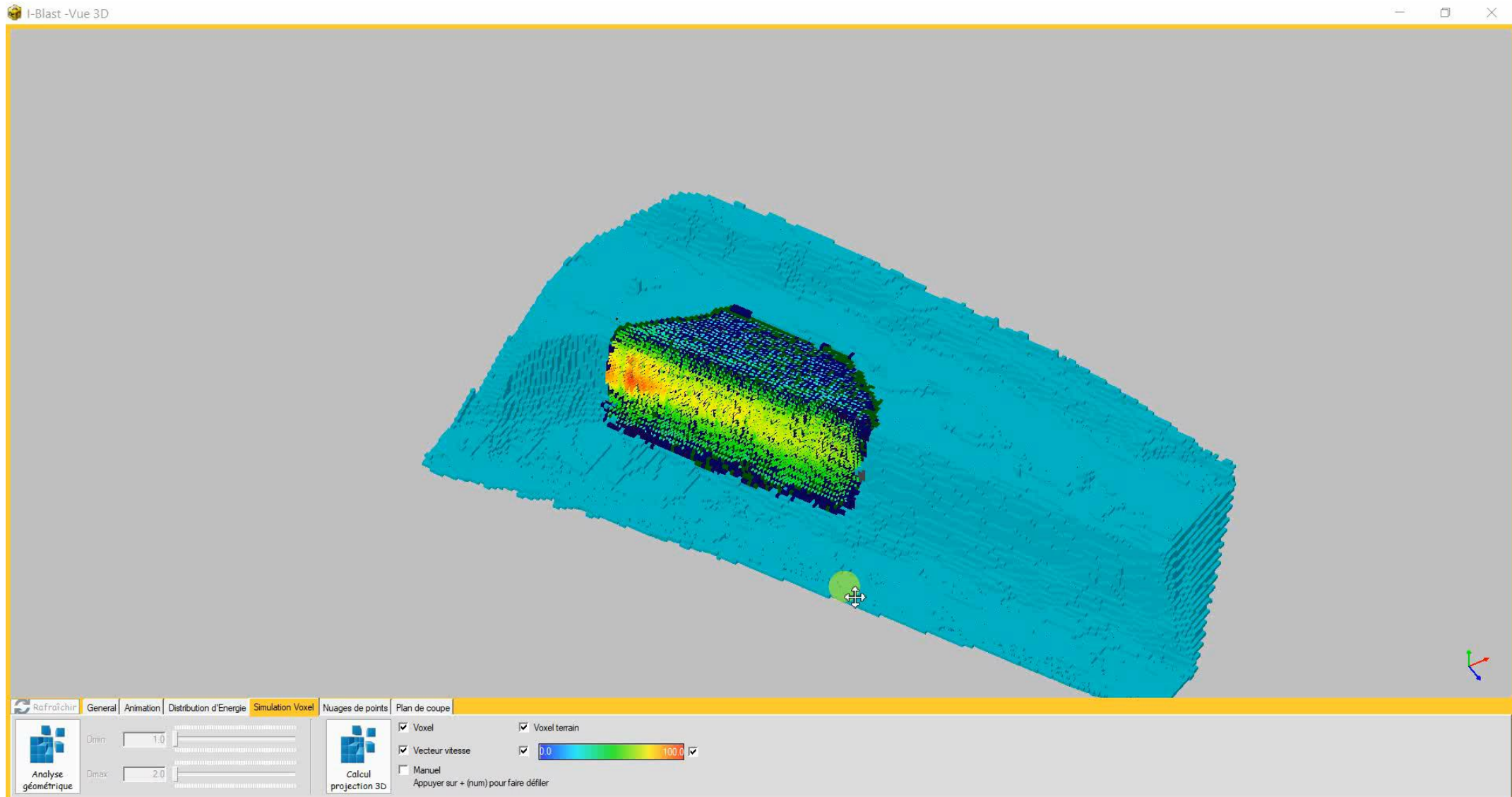
[BENEFITS OF REALISTIC 4D SIMULATION](#)

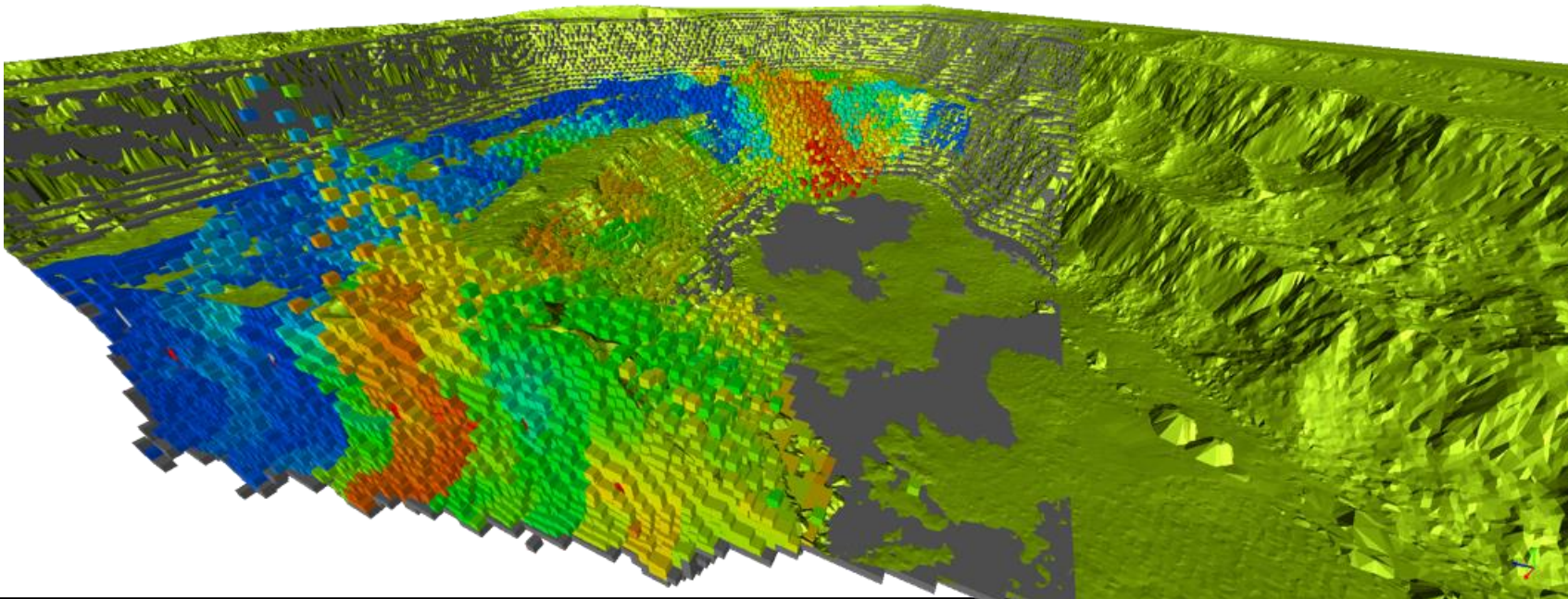
...

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВАЛА ВЗРЫВА (видео)



МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВАЛА ВЗРЫВА (видео)





ВЫВОДЫ

Экономические выгоды от моделирования взрыва:

- Снижение потерь (5-10%) и разубоживания (5%)
- Предотвращение ошибок селективной выемки (\$млн)
- Снижение удельного расхода ВВ (5%)
- Улучшение выхода фракций (снижение расходов на дробление и измельчение)
- Улучшение параметров подошвы и стенок, снижение количества негабаритов и соответствующих расходов
- Увеличение скорости отработки

Реалистичное высокоточное 4D моделирование взрыва

Контактное лицо в СНГ: Ольга Валентиновна Стагурова,
коммерческий директор ООО «ДНА-БЛАСТ МСК»
+7 (919) 105 37 60 o.stagurova@dna-blast.com



DNA-Blast Software
FOR A MILLION DOLLAR BENEFIT