

Моделирование подземных рудных тел на основе технологии

Л. Г. Муста

Санкт-Петербургский горный
университет императрицы
Екатерины II

Musta_LG@pers.spmi.ru

Д. А. Новак

Санкт-Петербургский горный
университет императрицы
Екатерины II

novak_da@pers.spmi.ru

Ю. Н. Кожубаев

Санкт-Петербургский горный
университет императрицы
Екатерины II

um-urii@mail.ru

Х. Чэн

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

benslimaneyoucef54@gmail.com

Аннотация. Ключевым направлением в развитии интеллектуальной добычи полезных ископаемых, а также важной отраслью визуализации научных вычислений. Эта технология использует данные, собранные в ходе геологической разведки и инженерного проектирования, для создания 3D-модели и отображает подземные слои горных пород, рельеф, структуры и другие 3D-характеристики на 2D-плоскости для достижения интуитивной выразительности. В данной работе в основном анализируются данные бурения и изучаются два основных направления: поверхностное и твердотельное моделирование в трехмерном геологическом моделировании. Для построения поверхности пласта используется общий алгоритм Кригинга и метод нерегулярной триангулированной сети (TIN). Затем моделирование сортности в объемном моделировании осуществляется с помощью модели тетраэдрических элементов (TEN), тем самым изменяя текущую ситуацию, когда дается только средняя сортность. Наконец, после анализа и изучения открытых данных бурения в данной работе применяются идеи для построения трехмерной модели рудного тела и получения точного распределения содержания в рудном теле с помощью модели TEN.

Ключевые слова: 3D геологическое моделирование, интерполяция Kriging, TIN, TEN

I. ВВЕДЕНИЕ

Будучи одним из столпов мировой экономики, горнодобывающая промышленность играет жизненно важную роль в индустриализации, модернизации и обеспечении национальной энергетической безопасности. Она не только обеспечивает сырьем такие отрасли, как строительство, производство и энергетика, но и занимает ключевую позицию в глобальном распределении ресурсов и международной торговле [1–3]. В последние годы с быстрым развитием информационных технологий теоретические методы и передовые технологии в области облачных вычислений, больших данных, искусственного интеллекта, Интернета вещей, виртуальной реальности, трехмерной визуализации и интеллектуальной добычи полезных ископаемых начали постепенно применяться в

горнодобывающей промышленности, обеспечивая теоретическую и техническую поддержку для преобразования цифровых шахт в умные шахты [4–6].

Технология трехмерного геологического моделирования является ключевым направлением развития интеллектуальных шахт, а также важной отраслью визуализации научных вычислений [7–9]. Эта технология использует данные, собранные в ходе геологической разведки и инженерного проектирования, для создания 3D-модели и отображает подземные горные образования, рельеф, структуры и другие 3D-характеристики на 2D-плоскости для достижения интуитивной выразительности. С развитием технологий и углублением их применения все больше горнодобывающих компаний стали уделять внимание этой технологии, которая играет роль, важность которой возрастает в планировании, строительстве и эксплуатации шахт [10–12]. Теоретические исследования и разработка соответствующего программного обеспечения также постоянно развиваются, помогая горнодобывающим компаниям уменьшить неопределенность при разработке подземных ресурсов и сократить возможные ошибки в процессе добычи, тем самым избегая ненужных экономических потерь [13–15].

Бурение является основным средством получения подземной геологической информации при 3D геологическом моделировании, а также важным способом понимания распределения подземных слоев пород и рудных тел [16–18]. Это наиболее распространенные данные в 3D геологическом моделировании. Его интуитивные, точные и детальные характеристики играют важную роль в 3D-моделировании.

Исходные данные бурения дополняются точками бурения, полученными с помощью алгоритма Kriging, что позволяет заполнить большое количество пробелов в данных в подстилающем пространстве, сделать выборку равномерной, сформировать более гладкую геологическую поверхность и тем самым сделать трехмерную геологическую модель более точной [19–20].

В данной работе обрабатываются данные бурения и используется технология 3D-визуализации для представления сложных геологических данных в виде 3D-изображений, что позволяет работникам предприятия наглядно наблюдать геологическую структуру и свойства рудных тел.

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ

В 3D геологическом моделировании поверхностное моделирование показывает только внешнюю форму рельефа, поэтому оно используется в основном для представления пластов или поверхности рельефа. Однако твердотельное моделирование, используемое для представления внутренней структуры, основано на поверхностном моделировании, поэтому поверхностное моделирование является основой 3D геологического моделирования [21–23].

При моделировании данные бурения в основном используются для выполнения таких задач, как разделение пластов и построение поверхности пластов. Поэтому в данной работе сначала используется алгоритм интерполяции Kriging для разделения пласта, а затем строится поверхность пласта с помощью нерегулярной модели триангулированной сети (TIN).

III. ДЕЛЕНИЕ НА СТРАТЫ

Пласты – это основные единицы 3D геологической модели. В трехмерной геологической модели может быть несколько или даже десятки пластов. В сложной геологической среде существуют сотни пластов, и их распределение неравномерно, неопределенно и прерывисто. Все геологическое 3D-моделирование должно в первую очередь решать проблему разделения пластов [24–25].

Исходные данные для геологического 3D-моделирования поступают из разведочных скважин. Каждая разведочная скважина отображает различную стратиграфическую информацию в зависимости от ее глубины. Поэтому в данной работе мы решили использовать координату высоты Z скважины для представления узлов между различными пластами.

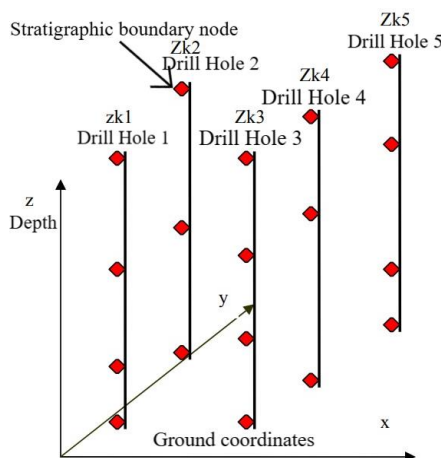


Рис. 1. Стратиграфическая диаграмма [составлено авторами]

Красные точки на рис. 1 представляют собой узлы стратиграфического оконтуривания. Из рисунка видно,

что координаты x , y каждой скважины неизменны и не влияют на стратиграфическое оконтуривание, которое в основном изменяется за счет различных значений z на разных глубинах. Однако стратиграфия имеет характеристики неоднородности, прерывистости и так далее, и поэтому состояние каждого стратиграфического слоя отражается на каждой скважине по-разному, и может оказаться, что определенный пласт не отображается на определенной скважине, или его размер может быть другим. Может оказаться, что определенный пласт не отображается на определенной скважине, а также может оказаться, что его размер отличается, поэтому в реальном процессе стратиграфического оконтуривания необходимо определить морфологию пласта в соответствии с реальной скважинной ситуацией.

Предположим, что количество скважин равно N , а скважина с наибольшим количеством пластов среди всех скважин выбрана в качестве стандартной скважины, и количество ее пластов равно M . Создадим таблицу отношений между пластами и всеми скважинами.

ТАБЛИЦА I. ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ПЛАСТАМИ И СКВАЖИНАМИ
[СОСТАВЛЕНО АВТОРАМИ]

Strata	Drill-Hole-1	Drill-Hole-2	Drill-Hole-3	...	Drill-Hole-N
Strata-1	$P(x_1, y_1, z_{11})$	$P(x_2, y_2, z_{21})$	$P(x_3, y_3, z_{31})$	...	$P(x_n, y_n, z_{n1})$
Strata-2	$P(x_1, y_1, z_{12})$	$P(x_2, y_2, z_{22})$	$P(x_3, y_3, z_{32})$	...	$P(x_n, y_n, z_{n2})$
Strata-3	$P(x_1, y_1, z_{13})$	$P(x_2, y_2, z_{23})$	$P(x_3, y_3, z_{33})$	...	$P(x_n, y_n, z_{n3})$
Strata-4	$P(x_1, y_1, z_{14})$	$P(x_2, y_2, z_{24})$	$P(x_3, y_3, z_{34})$	...	$P(x_n, y_n, z_{n4})$
...	...	...	...	...	...
Strata-M	$P(x_1, y_1, z_{1m})$	$P(x_2, y_2, z_{2m})$	$P(x_3, y_3, z_{3m})$	...	$P(x_n, y_n, z_{nm})$

Как показано в табл. 1, пласт 1 имеет значение 0 на скважине 2, а пласт 3 имеет значение 0 на скважине 3. Пласт, отмеченный как 0, не отражен в этой скважине. Выше получена взаимосвязь между каждой скважиной и каждой стратой, которая закладывает основу для разделения пластов.

На основе таблицы отношений методом обхода указателей находятся скважинные узлы, соответствующие геологической информации страты сопряжения, а затем формируется страта сопряжения в соответствии с координатной информацией каждого скважинного узла. По аналогии строятся все разделительные линии, чтобы завершить простое разделение пластов.

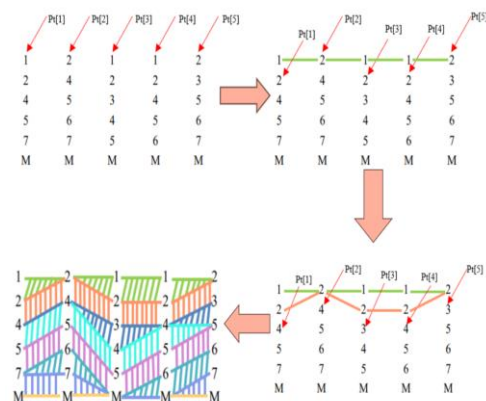


Рис. 2. Простая схема разделения страт [составлено авторами]

Как показано на рис. 2, на первом изображении стратиграфическая информация, на которую указывает каждый указатель, имеет следующие значения: $pt[1] = 1$, $pt[2] = 2$, $pt[3] = 1$, $pt[4] = 1$, $pt[5] = 2$. Когда они соединяются, то образуют первый стратиграфический интерфейс. Затем геологическая информация, соответствующая каждому указателю, сравнивается с геологической информацией, соответствующей первому интерфейсу. Поскольку указатель $pt[2]$ и указатель $pt[5]$ отличаются друг от друга, эти два указателя остаются на месте, а остальные указатели перемещаются вниз. Таким образом, получается результат простой стратификации стратиграфического слоя.

Путем простого разделения пластов можно получить координаты буровых скважин в каждом слое страты, как показано в следующей таблице:

ТАБЛИЦА II. ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ПЛАСТАМИ И
КООРДИНАТАМИ СКВАЖИН [СОСТАВЛЕНО АВТОРАМИ]

Strata	Drill Hole-1	Drill Hole-2	Drill Hole-3	...	Drill Hole-N
Strata-1	$P(x_1, y_1, z_{11})$	$P(x_2, y_2, z_{21})$	$P(x_3, y_3, z_{31})$	...	$P(x_n, y_n, z_{n1})$
Strata-2	$P(x_1, y_1, z_{12})$	$P(x_2, y_2, z_{22})$	$P(x_3, y_3, z_{32})$	...	$P(x_n, y_n, z_{n2})$
Strata-3	$P(x_1, y_1, z_{13})$	$P(x_2, y_2, z_{23})$	$P(x_3, y_3, z_{33})$	...	$P(x_n, y_n, z_{n3})$
Strata-4	$P(x_1, y_1, z_{14})$	$P(x_2, y_2, z_{24})$	$P(x_3, y_3, z_{34})$	...	$P(x_n, y_n, z_{n4})$
...	...	...	...	...	...
Strata-M	$P(x_1, y_1, z_{1m})$	$P(x_2, y_2, z_{2m})$	$P(x_3, y_3, z_{3m})$	...	$P(x_n, y_n, z_{nm})$

Из-за небольшого количества буровых скважин на каждом стратиграфическом слое имеется меньше точек выборки, а непосредственно построенный стратиграфический слой является относительно грубым и недостаточно точным. Поэтому, чтобы получить больше точек выборки, необходимо выполнить операции интерполяции для каждого стратиграфического слоя.

В данной работе для интерполяции каждого уровня грунта используется обычный метод интерполяции Kriging. Kriging – это эффективный метод пространственной интерполяции, основанный на теории оптимального линейного несмещенного оценивания. Математически доказано, что этот метод способен достичь цели минимизации ошибок при заданных предположениях. В частности, Kriging прогнозирует значения атрибутов в невыбранных местах, учитывая значения атрибутов в точках выборки и придавая им соответствующие веса. Этот метод также использует дисперсию Kriging для измерения гладкости результатов прогнозирования, тем самым обеспечивая количественное описание неопределенности прогноза.

При стратиграфическом моделировании из-за неравномерного распределения геологических структур и расположения скважин некоторые переменные в геологических данных распределены случайным образом, поэтому они представлены регионализированными переменными [30–31]. Для регионализированной переменной $Z(x)$ предполагается, что в регионе есть невыбранная точка x_0 и n близлежащих точек выборки $\{x_i, i=1, \dots, n\}$.

Предполагая, что регионализированная переменная $Z(x)$ удовлетворяет предположению о стационарности второго порядка.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

где $Z^*(x_0)$ – значение оцениваемой точки, λ_i – влияние i -й точки выборки на оцениваемую точку, $Z(x_i)$ – измеренное значение i -й точки.

Линейная несмещенность требует, чтобы ожидаемое значение оценки было равно истинному значению, поэтому мы имеем формулу (2).

$$EZ^*(x_0) - Z(x_0) = E\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) - Z(x_0)\right] \quad (2)$$

где $Z(x_0)$ – истинное значение.

При предположении о стационарности второго порядка геостатистики математическое ожидание регионализированной переменной $Z(x)$ существует и является константой, что можно выразить формулой (3).

$$E[Z(x)] = m \quad (3)$$

где m – константа.

Согласно гипотезе собственных значений, ожидаемое значение приращения регионализированной переменной $Z(x)$ равно 0, что может быть выражено (4).

$$E[Z(x) - Z(x+h)] = 0 \quad x, h \quad (4)$$

где h обозначает расстояние между двумя точками выборки.

Согласно формуле (2), формула (3), формула (4) могут быть далее выведены в формулу (5).

$$\begin{aligned} E\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) - Z(x_0)\right] &= \sum_{i=1}^n \lambda_i E[Z(x_i)] - \\ E[Z(x_0)] &= 0 \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^n \lambda_i &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

Цель метода Kriging – минимизировать дисперсию ошибки оценки $Z^*(x_0) - Z(x_0)$. Формула дисперсии Kriging может быть выражена в виде (6).

$$\begin{aligned} \sigma_E^2 &= E[(Z^*(x_0) - Z(x_0))^2] \\ &= C(x_0, x_0) - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_0, x_i) + \\ &\quad \sum_{i,j=1}^n \lambda_i \lambda_j C(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (6)$$

где $C(x_i, x_j)$ представляет собой ковариацию между наблюдениями $Z(x_i)$ и $Z(x_j)$. σ_E^2 – дисперсия

Для нахождения минимального значения дисперсии Kriging применяется метод множителей Лагранжа, и в итоге система уравнений Kriging может быть выведена в виде формулы (7), Формула для вычисления обычной дисперсии Kriging представлена в виде формулы (8).

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i, x_j) - \mu = C(x_i, x_0) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\sigma_C^2 = C(x_0, x_0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_0, x_i) + \mu \quad (8)$$

где μ – множитель Лагранжа.

Уравнения Kriging можно записать в матричной форме, как показано в уравнении (9).

$$\begin{bmatrix} C(x_1, x_1) & \dots & C(x_1, x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(x_n, x_1) & \dots & C(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & \vdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(x_0, x_1) \\ \vdots \\ C(x_0, x_n) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Из приведенной выше теории можно получить алгоритм интерполяции поверхности пласта методом Kriging. Схема алгоритма выглядит следующим образом.

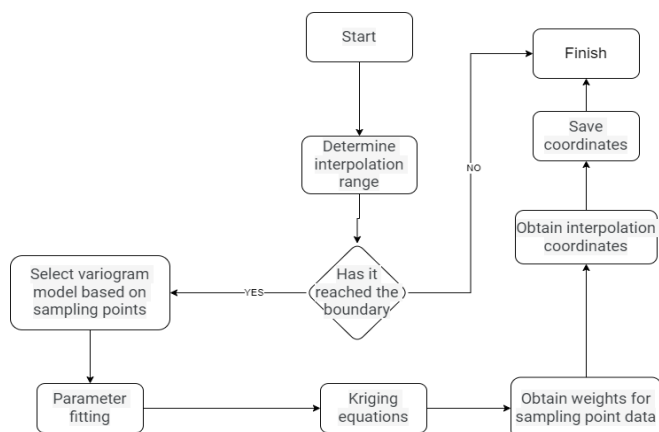


Рис. 3. Схема стратиграфической стратификации [составлено авторами]

IV. СТРУКТУРА СТРАТИГРАФИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Все точки интерполяции на границе каждого пласта были получены с помощью обычного кригинга. Затем эти нерегулярные дискретные точки необходимо соединить для построения поверхности. В данной работе для построения поверхности пласта выбрана модель нерегулярной триангулированной сети (TIN). Модель TIN имеет хорошую топологическую связь в структуре, что делает ее превосходной в соединении и организации между точками, ребрами и треугольниками. TIN представляет поверхность рельефа через серию непересекающихся и непересекающихся треугольников. Модель TIN использует эти нерегулярные треугольники, чтобы хорошо передать сложность рельефа. Каждый треугольник может адаптироваться к изменениям рельефа, тем самым обеспечивая детальное описание местности.

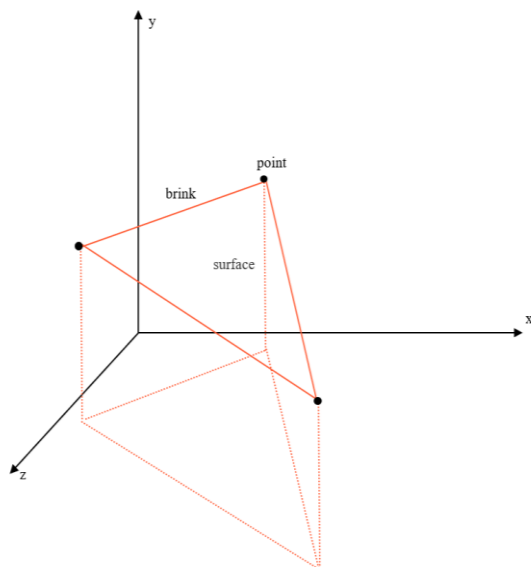


Рис. 4. Диаграмма TIN [составлено авторами]

Модель нерегулярной триангулированной сети (TIN) состоит в основном из узлов, ребер и граней.

Узлы (точки выборки): В качестве основы модели TIN узлы представляют собой точки выборки на местности. Они являются исходными точками данных, необходимыми для построения модели TIN.

Грани (общие границы): Грани – это отрезки прямых линий, соединяющие два соседних узла. Они являются границами, общими для двух треугольников. Грани включают не только небольшие изогнутые участки на местности, но также могут включать линии объектов и границы регионов.

Лицо (треугольник): Лицо – это треугольник, состоящий из трех ближайших узлов. Это базовая единица, используемая TIN для описания поверхности рельефа. Поскольку координата Z (т. е. высота) каждого узла может быть разной, каждый треугольник имеет определенный угол наклона в локальной области, формируя таким образом непрерывность поверхности рельефа.

В данной работе триангулированная модель сети формируется методом вставки точки за точкой. Сначала строится минимальный прямоугольник, содержащий все точки данных, в виде выпуклого корпуса, который используется в качестве начального каркаса триангулированной сети. В этом прямоугольнике формируется начальный треугольник, затем точки данных вставляются одна за другой, и треугольник восстанавливается до тех пор, пока не будут обработаны все точки. Структурная схема выглядит следующим образом:

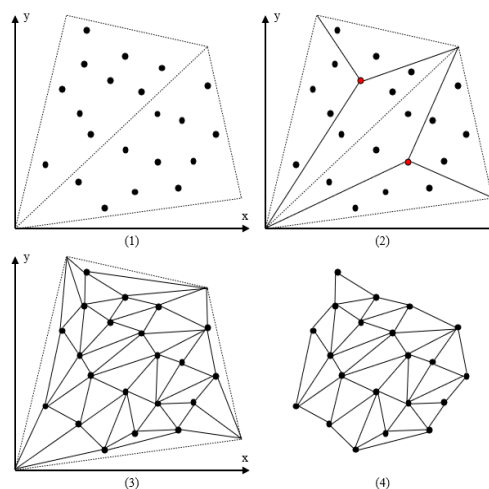


Рис. 5. Блок-схема TIN [составлено авторами]

Твердотельное моделирование

При поверхностном моделировании строится только поверхность геологического тела, которая содержит информацию о поверхности и не имеет внутренних атрибутов. В реальном процессе добычи полезных ископаемых в центре внимания оказываются внутренние атрибуты геологического тела, такие как содержание минералов, твердость пород и т. д., поэтому требуется твердотельное моделирование.

Твердотельное моделирование – это разделение геологического тела на мелкие части в соответствии с его атрибутами. Существует множество методов, таких

как технология интерактивной 3D-резки [15], технология скрытой 3D-графики [16], модель элементов тетраэдра [17], модель линейного восьмигранника [18] и т. д. Среди них модель элементов тетраэдра является очень распространенной моделью 3D геологического моделирования. Поэтому в данной работе мы решили использовать модель элементов тетраэдра для твердотельного моделирования, чтобы реализовать функцию разделения качества минералов.

Модель вокселей «Тетраэдрическая сеть» (TEN) создана на основе исследования трехмерной триангуляции Делоне. Она соединяет разрозненные точки в пространстве непересекающимися прямыми линиями, образуя треугольную сеть. Ее суть заключается в трехмерном расширении нерегулярной триангулированной сети. По своей структуре она похожа на TIN.

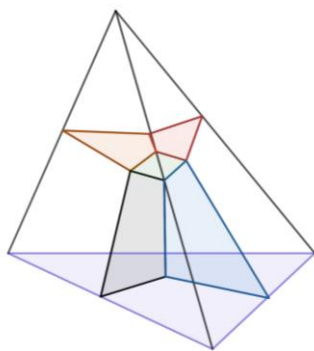


Рис. 6. Принципиальная схема TEN [составлено авторами]

Модель TEN состоит в основном из четырех примитивов: тетраэдра, треугольника, ребра и узла. Пространственный объект состоит из тетраэдров, грани – из треугольников, линии – из ребер маленьких треугольников, а точки – из узлов. Короче говоря, в модели TEN каждый узел должен принадлежать ребру, каждое ребро – треугольнику, а каждый треугольник – тетраэдру. Поскольку модель TEN использует концепцию симплекс-комплекса, она может полностью описывать различные топологические отношения в трехмерном пространстве.

При создании трехмерной модели рудного тела TEN сначала производится комплексная сортировка данных о содержании и координатах проб в рудном теле в соответствии с типом руды, включая устранение ошибок и избыточности, а также сортировку форматов. Затем базовый элемент моделирования TEN-блок используется в качестве основного сегмента блока для подсчета запасов рудного тела, и рассчитываются основные данные каждого TEN-блока: объем и среднее содержание.

1. Объем:

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix} \quad (10)$$

где (x_i, y_i, z_i) координата i -й вершины блока TEN;

2. Степень:

Если значения оценок в четырех вершинах блока TEN не сильно отличаются друг от друга, среднюю оценку можно принять за среднее значение оценок в каждой вершине, т.е.

$$C = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 C_i \quad (11)$$

где C_i – оценка в i -й вершине блока TEN, то есть оценка узла TIN, интерполированная по значению оценки исходной контрольной точки;

Если значения оценок в четырех вершинах блока TEN сильно различаются, средняя оценка может быть получена путем взвешенного среднего оценок в четырех вершинах, причем вес равен обратной величине расстояния между вершиной и центроидом, т.е. методом обратной интерполяции с взвешиванием по расстоянию:

$$C = \sum_{i=1}^4 \frac{C_i}{d_i^2} / \sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i^2} \quad (12)$$

где d_i – евклидово расстояние между i -й вершиной и центроидом, а координаты центроида задаются:

$$(x, y, z) = \left(\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_i, \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 y_i, \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 z_i \right) \quad (13)$$

где (x_i, y_i, z_i) координата i -й вершины блока TEN;

Когда узлы TN модели рудного тела достаточно плотные, ошибка использования взвешенного значения оценки каждого узла в качестве среднего содержания блока TEN также мала, и вес каждого узла также может быть соответствующим образом скорректирован в соответствии с фактической ситуацией. Среднее содержание всего рудного тела может быть оценено средневзвешенным значением среднего содержания каждого блока TEN с его объемом или весом в качестве веса. Блок-схема выглядит следующим образом:

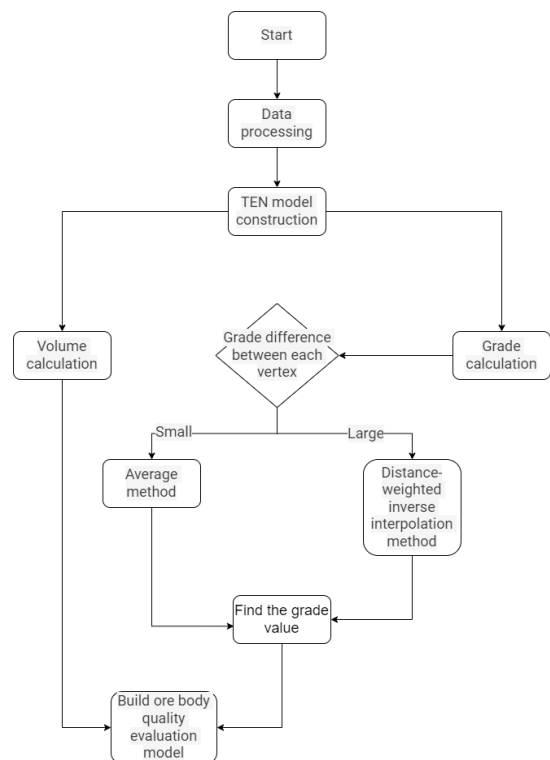


Рис. 7. Блок-схема TEN [составлено авторами]

V. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОЦЕДУРА

На основе вышеуказанных методов и исследований в данной работе предлагается новый метод, во-первых, очистки и стандартизации исходных данных геологических буровых скважин, отбора и анализа проб, топографической съемки и т. д., включая устранение выбросов, заполнение недостающих данных, унификацию системы координат и преобразование формата, чтобы обеспечить согласованность и надежность данных. Затем применяется интерполяция Кригинга для пространственной интерполяции разреженных атрибутивных данных, таких как содержание и толщина. Затем метод интерполяции Кригинга был использован для пространственной интерполяции разреженных данных о содержании, толщине и других атрибутах, анализа пространственной корреляции атрибутов рудного тела путем построения модели вариограммы и оптимизации весов интерполяции путем объединения с параметром полувариации для получения непрерывного распределения полей атрибутов рудного тела. На этапе моделирования поверхности дискретные точки рельефа преобразуются в непрерывную модель поверхности рельефа на основе алгоритма нерегулярной треугольной сети (TIN), а топология треугольной сетки оптимизируется с помощью триангуляции Делоне для обеспечения гладкости и точности морфологии поверхности; в то же время, в сочетании с интерпретацией геологических профилей и данных о литологической слоистости, стратиграфический интерфейс пространственно разделяется, и каждый слой породы строится послойно. В то же время, в сочетании с интерпретацией геологических разрезов и данными о литологической стратификации, стратиграфический интерфейс пространственно разделяется, и геометрические поверхности каждого слоя горных пород или тектонической единицы строятся послойно для уточнения пространственных отношений между рудным телом и окружающими породами.

При трехмерном твердотельном моделировании технология тетраэдрических сетей (TEN) используется для преобразования сложных геологических структур, таких как границы рудных тел, стратиграфические интерфейсы и разломы, в неструктурированные сетки, а тетраэдрические блоки используются для вокселизации внутренней части рудного тела. Конкретный процесс показан на рисунке ниже.

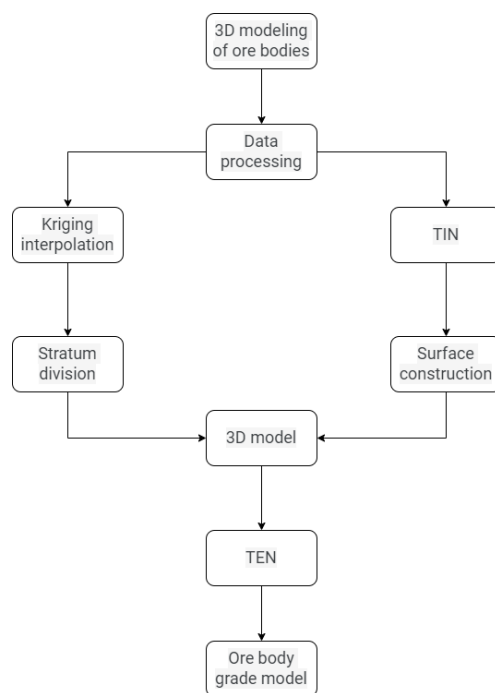


Рис. 8. Экспериментальная процедура [составлено авторами]

VI. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенного выше исследования соответствующих алгоритмов 3D-геологического моделирования на основе скважинных данных мы в основном освоили использование скважинных данных для моделирования. Ниже на примере рудника мы рассмотрим создание 3D-геологической модели по скважинным данным. Лицо и стратиграфическая структура создаются с помощью скважинных данных, а затем определяется уклон каждой точки с помощью метода твердотельного моделирования.

В качестве примера в данной работе выбран железорудный рудник Hegang Group Qian'an Hongshan, при добыче которого предварительная работа была проведена более качественно, поэтому в данной работе для анализа выбран железорудный рудник Hegang Group Qian'an Hongshan. (<http://www.hbisco.com>)

Авторы данной статьи обратились по электронной почте и получили ответ от этой компании с просьбой предоставить необходимые скважинные данные и получить доступ в Китайский банк геологических данных. <http://www.ngac.cn>

Шахта Хуншань расположена в 12 км к юго-востоку от города Цяньань, провинция Хэбэй, с географическими координатами 118°49'15" ~118°50'15" в.д., 39°56'45" ~39°57'45" с.ш., высота горных работ +69,98м~740,00м, а площадь шахты составляет 0,7133 кв. км. С 2011 года началась геологическая разведка, и, согласно геологическому отчету, общие ресурсы рудника составляют 3 606,47 млн тонн железной руды и сверхбедной железной руды, в общей сложности 6 разведочных линий и 42 буровых скважины. Топографическая карта представлена ниже:

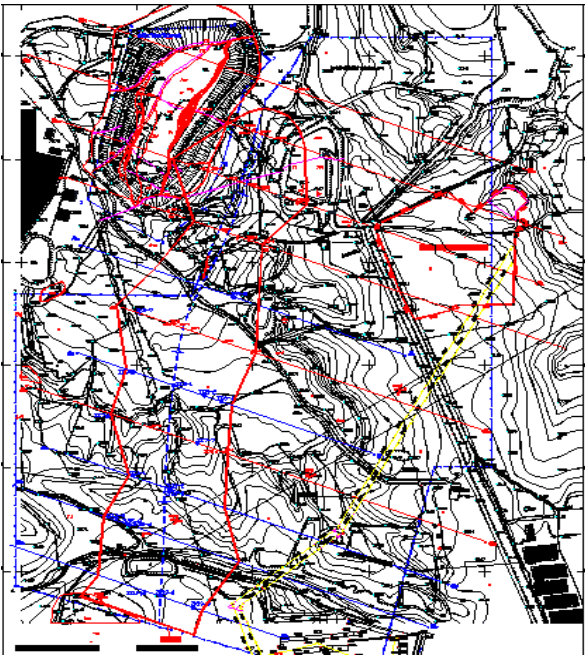


Рис. 9. Топографическая карта

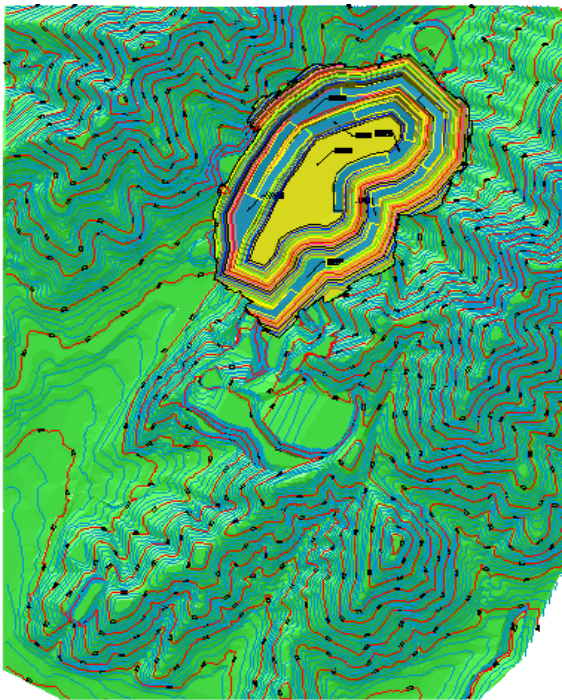


Рис. 10. Топографическая карта [составлено авторами]

VII. СТРУКТУРА ДАННЫХ СКВАЖИНЫ

Бурение – основной способ получения подземной геологической информации и важный способ понять распределение подземных слоев горных пород и рудных тел. Это наиболее распространенные данные при 3D-моделировании геологических процессов. Его интуитивные, точные и детальные характеристики играют важную роль в 3D-моделировании. Координатные данные некоторых скважин в случае, выбранном в этой работе, следующие:

ТАБЛИЦА III. ЧАСТИЧНЫЕ КООРДИНАТЫ СКВАЖИН [СОСТАВЛЕНО АВТОРАМИ]

Линия разведки	Номер проекта	X координата	Y координата	Z координата
4	ZK2	2105,849	4851,491	266
	ZK20	2036,908	4779,054	269,001
	ZK22	2449,706	5077,24	285,935
2	ZK23	2066,245	5027,235	283,861
	ZK24	2352,278	4893,056	299,267
6	ZK25	2199,43	4897,602	272
	ZK26	2109,272	4710,182	268,216

ZK означает сверление

3DMine Plus – это профессиональное 3D программное обеспечение для горной промышленности, разработанное компанией Beijing DongAoDa Technology Co., Ltd., ориентированное на геологическое моделирование шахт, оценку запасов ресурсов, проектирование шахт и управление производством. Программное обеспечение широко используется в управлении всем жизненным циклом металлических, угольных и неметаллических шахт, сочетая стандарты китайской горнодобывающей промышленности и практические потребности. Поэтому в данной работе мы решили использовать это программное обеспечение для экспериментального моделирования.

Чтобы более наглядно увидеть распределение скважин в плоскости, таблица координат скважин объединяется для анализа, а распределение и подробные данные по каждой скважине представляются в виде пространственной стереограммы.

Сначала составьте и импортируйте стандартную таблицу, содержащую координаты устья скважины (X, Y, Z) и данные атрибутов, чтобы убедиться, что система координат соответствует проекту. Создайте диаграмму рассеяния скважин в плане, выделите типы скважин или атрибуты с помощью стилей символов и наложите топографическую карту или границу шахты, чтобы улучшить пространственные привязки; переключитесь в 3D-вид, сопоставьте вертикальное положение скважин с высотами кубов и используйте функцию визуализации атрибутов, чтобы связать числовые атрибуты с градиентами цвета или высотами столбцов, с помощью функции рендеринга атрибутов привязываются к цветовым градиентам или высотам столбцов, как показано на следующем рисунке:

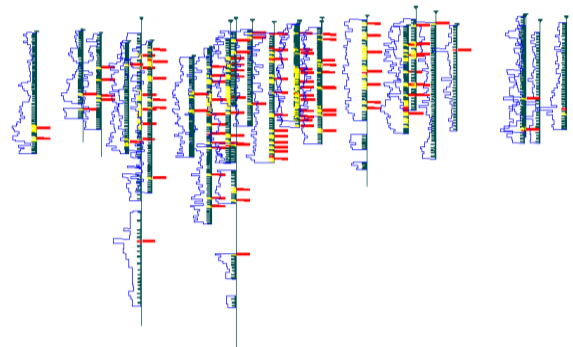


Рис. 11. Схема бурового пространства [составлено авторами]

VIII. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РУДНОГО ТЕЛА

Моделирование поверхности рудного тела в основном состоит из двух частей. Сначала необходимо проанализировать данные бурения по каждой линии разведки, разделить пласты с помощью алгоритма интерполяции Kriging, а затем построить лицо, сформулировав алгоритм нерегулярной триангулированной сети, чтобы создать трехмерную модель рудного тела. В примере, выбранном в этой работе, имеется 8 линий разведки, как показано на рисунке:

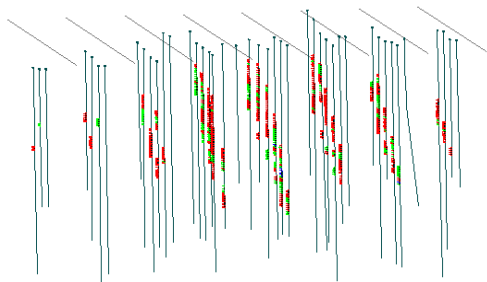


Рис. 12. Карта пространства разведочных линий [составлено авторами]

Сначала для разделения страт используется алгоритм интерполяции Kriging. Чем больше точек интерполяции, тем точнее модель. После интерполяции лицо рудного тела строится по алгоритму нерегулярной триангуляции.

Выберите модуль «Геостатистика» в программе, используйте алгоритм интерполяции Kriging для интерполяции стратиграфических данных и установите параметры полувариационной функции для оптимизации точности интерполяции; после завершения интерполяции переключитесь на модуль «Моделирование поверхности» и используйте алгоритм нерегулярной треугольной сети (TIN) для преобразования результатов интерполяции в непрерывные треугольные поверхности сетки. После завершения интерполяции переключитесь на модуль «Моделирование поверхности», используйте алгоритм нерегулярной треугольной сети (TIN) для преобразования результатов интерполяции в непрерывные треугольные сетчатые поверхности и оптимизируйте качество сетки путем настройки параметров треугольного сечения (например, максимальной длины стороны, минимального угла), чтобы обеспечить гладкость стратиграфического интерфейса и геометрическую точность; наконец, наложите созданную поверхность рудного тела на топографию, окружающие породы и другие модели и используйте трехмерное представление для проведения визуального осмотра. Результаты построения следующие:

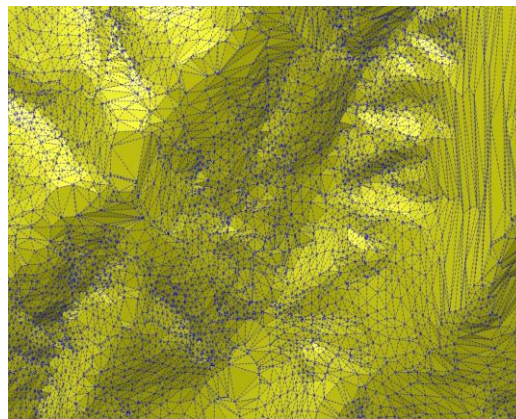


Рис. 13. Построение стратиграфической поверхности [составлено авторами]

Приведенный выше рисунок – результат построения нерегулярной триангулированной сети по точкам интерполяции. Трехмерная модель всего рудного тела может быть получена с помощью построения нерегулярной триангулированной сети.



Рис. 14. Трехмерная модель рудного тела [составлено авторами]

Судя по направлению рудного тела, руды много на левой стороне и меньше на правой, и она простирается глубже с каменистым участком в середине.

3. Твердотельное моделирование рудных тел

Выберите модуль «блочная модель» в программном обеспечении, используйте метод тетраэдрической сети (TEN) для вокселизации рудного тела и установите соответствующий размер ячеек, чтобы сбалансировать точность и эффективность расчетов; свяжите данные о содержании с тетраэдрическими ячейками для создания непрерывного поля распределения содержания; используйте функцию визуализации атрибутов для отображения значений содержания в виде цветовых градиентов или прозрачности в 3D-виде; используйте инструмент резки для создания профилей содержания в любом направлении для дальнейшего анализа схемы распределения участков с высоким содержанием; используйте инструмент резки для создания профилей содержания в любом направлении для дальнейшего анализа схемы распределения участков с высоким содержанием. В 3D-виде используйте функцию рендеринга атрибутов для отображения значений содержания в цветовом градиенте или прозрачности, чтобы визуализировать распределение содержания внутри рудного тела; создайте профиль содержания в любом направлении с помощью инструмента резки;

Карта распределения содержания в рудном теле может быть построена методом TEN.

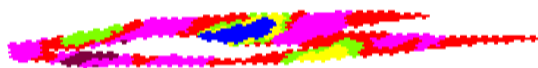


Рис. 15. Градуировочная модель рудного тела [составлено авторами]

На рисунке выше, при определении границы рудного блока, класс границы выше 40. В этой работе содержание ниже 40 обозначено синим цветом, содержание 40-45 – желтым, 45-50 – зеленым, 50-55 – красным, а выше 55 – розовым. Общее содержание руды в рудном теле хорошее и соответствует требованиям добычи. Однако белая часть в центре – это горная часть рудного тела, которая составляет большую часть.

Чтобы получить более полное представление о качестве минерала, рисунок выше увеличен, и часть карты распределения содержания перехвачена.

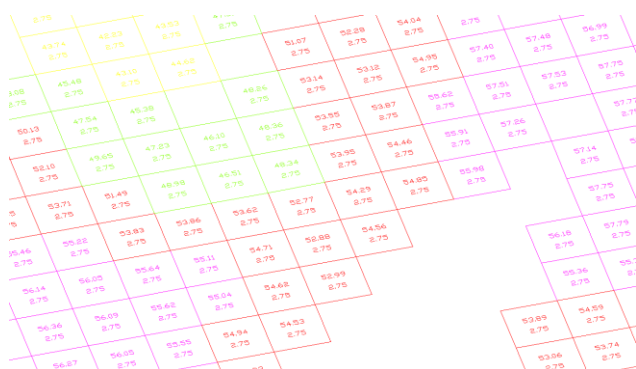


Рис. 16. Частичный срез модели содержания руды в рудном теле [составлено авторами]

На рисунке выше мы можем четко видеть содержание руды в каждом участке. При последующей добыче мы сможем обоснованно добывать руду в соответствии с содержанием руды в каждом участке.

IX. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для моделирования полезных ископаемых в трехмерной визуализации в данной работе проводится поверхностное и твердотельное моделирование. При поверхностном моделировании геологические слои шахты разделяются и строятся поверхности. При твердотельном моделировании моделируется качество минералов.

Основное содержание исследования в данной работе следующее:

1. Интерпретация и обработка данных бурения при геологической разведке, разработка задач и процессов трехмерного геологического моделирования.

2. Разработано применение алгоритма интерполяции Kriging в трехмерном геологическом моделировании. На основе всестороннего изучения алгоритма интерполяции разработан алгоритм интерполяции на основе данных бурения для реализации разделения пластов в трехмерной геологической модели, а для построения поверхности пластов использована нерегулярная триангулированная сеть (TIN).

3. Изучено применение модели тетраэдрических элементов (TEN) для расчета содержания руды в рудном теле и смоделировано качество рудного тела.

Хотя разделение пластов, построение поверхностей и изучение моделирования содержания в трехмерном геологическом моделировании может быть реализовано с помощью исследования данной работы, в процессе исследования также имеются следующие недостатки: 1. В процессе разделения пластов не учитываются особые геологические условия, такие как разломы. На следующем этапе в алгоритмы стратиграфического деления и моделирования поверхности необходимо добавить соответствующую геологическую информацию о разломах.

4. В данной работе различные задачи решаются в основном с помощью теоретических исследований. В качестве источника данных выбраны общедоступные данные, точность которых неизвестна, и точность содержания исследования в данной работе нуждается в дальнейшей проверке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kazanin, O.I. (2023). Promising technology trends in underground coal mining in Russia. *Gornyi Zhurnal*, 2023(9), 4-11. DOI:10.17580/gzh.2023.09.01
- [2] Nevskaya M, Sharapova A, Kosovtseva T, Nikolaychuk L. (2024). Applications of simulation modeling in mining project risk management: criteria, algorithm, evaluation. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*. 8(x): 5375. DOI: 10.24294/jipd.v8ix.5375
- [3] Beloglazov, I. I., Petrov, P. A., & Bazhin, V. Y. (2020). The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry. *Eurasian Mining*, 2020(2), 50-54. DOI:10.17580/em.2020.02.12.
- [4] Filippov E.V., Zakharov L.A., Martyushev D.A., Ponomareva I.N. Reproduction of reservoir pressure by machine learning methods and study of its influence on the cracks formation process in hydraulic fracturing // *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 258. p. 924-932. DOI: 10.31897/PMI.2022.103
- [5] Karnauhov A.M., Kozhubaev Yu.N., Ilin A.E., Ivanov V.V. Controlling of the digital transformation oil and gas industry // *XI International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITSE-2023) E3S Web of Conferences*. – 2023. V. 431, 05031 DOI: 10.1051/e3sconf/202343105031.
- [6] Nepsha F.S., Voronin V.A., Liven A.S., Korneev A.S. Feasibility study of using cogeneration plants at Kuzbass coal mines // *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 259. p. 141-150. DOI: 10.31897/PMI.2023.2
- [7] Brilliant, L.S., Zavialov, A.S., Danko, M.U., Andronov, K.A., Shpurov, I.V., Bratkova, V.G., & Davydov, A.V. (2022). Integration of machine learning methods and geological and hydrodynamic modeling in field development design. *Neftyanoe Khozyaystvo - Oil Industry*, 2022(3), 48-53. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-3-48-53
- [8] Torresan F, Piccinini L, Pola M, Zampieri D, Fabbri P (2020) 3Dhydrogeological reconstruction of the fault-controlled EuganeanGeothermal System (NE Italy). *Eng Geol* 274. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105740
- [9] Ghiglieri G, Carletti A, Da Pelo S, Cocco F, Funedda A, Loi A, Manta F, Pittalis D (2016) Three-dimensional hydrogeological reconstruction based on geological depositional model: A case study from the coastal plain of Arborea (Sardinia, Italy). *Eng Geol* 207:103–114. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.04.014
- [10] Zemenkova M.Y., Chizhevskaya E.L., Zemenkov Y.D. Intelligent monitoring of the condition of hydrocarbon pipeline transport facilities using neural network technologies // *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 258. p. 933-944. DOI: 10.31897/PMI.2022.105

- [11] Muratbakeev E.H., Kozhubaev Y.N., Yao Y., Shehzad U. Symmetrical Modeling of Physical Properties of Flexible Structure of Silicone Materials for Control of Pneumatic Soft Actuators. *Symmetry* 2024, 16, 750. DOI: 10.3390/sym16060750.
- [12] Vasiliev, B.Y., Kozyaruk, A.E. & Mardashov, D.V. Increasing the Utilization Factor of an Autonomous Inverter under Space Vector Control. *Russ. Electr. Engin.* 91, 247–254 (2020). DOI: 10.3103/S1068371220040082
- [13] Kaplan, U.E.; Topal, E. A New Ore Grade Estimation Using Combine Machine Learning Algorithms. *Minerals* 2020, 10, 847. DOI: 10.3390/min10100847
- [14] Materova, E.S., Aksenova, Zh.A., Sharafullina, R.R., Galimova, G.A., Shilov, M.L. (2024). Digitalization of operations in the Russian mining companies. *Ugol*, (11), 117-121. DOI:10.18796/0041-5790-2024-11-117-121.
- [15] Manikovskiy P., Vasjutich L., Sidorova G. Methodology for modeling ore deposits in the GIS Micromine // *Transbaikal State University Journal*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 6–14. DOI: 10.21209/222792452021272614.
- [16] Hao M, Zhang Y, Zhan Q, Wang D, Liu Z, Lei C and Fan M (2024) Research and application of urban three-dimensional geological modeling technology based on multiple and complex geological structures: a case study of Chengdu, China. *Front. Earth Sci.* 12:1444861. DOI: 10.3389/feart.2024.1444861
- [17] Ali M., Abdelmaksoud, A. Essa M. A., Abdelhady, A., and Darwish, M. (2020). 3D structural, facies and petrophysical modeling of C member of six hills formation, komombo basin, upper Egypt. *Nat. Resour. Res.* 29 (4), 2575–2597. DOI: 10.1007/s11053-019-09583-5
- [18] Yang, X., Tang, S., Zhang, S. et al. Applying 3D geological modeling to predict favorable areas for coalbed methane accumulation: a case study in the Qinshui Basin. *Front. Earth Sci.* (2024). DOI: 10.1007/s11707-024-1116-z
- [19] Jia, K., Li, W., and Che, D. (2020). Triangulated irregular network with constraints. Ordinary kriging method for three-dimensional modeling of faulted geological surfaces. *IEEE Access* 8, 85179–85189. DOI: 10.1109/access.2020.2993050
- [20] Liu X., Zhang, P., Guo, Y., Ma, G., and Liu, M. (2023). Study of a high-precision complex 3D geological modelling method based on a fine KNN and kriging coupling algorithm: a case study for Jiangsu, China. *Front. Earth Sci.* 11. DOI: 10.3389/feart.2023.1325907
- [21] Hao M, Zhang Y, Zhan Q, Wang D, Liu Z, Lei C and Fan M (2024) Research and application of urban three-dimensional geological modeling technology based on multiple and complex geological structures: a case study of Chengdu, China. *Front. Earth Sci.* 12:1444861. DOI: 10.3389/feart.2024.1444861
- [22] Chen, Y., Yang, H., Ye, Y., and Li, J. (2024). Generation of 3D finite element mesh of layered geological bodies in intersecting fault zones. *PLOS ONE* 19 (1), e0293193. DOI: 10.1371/journal.pone.0293193
- [23] Chen, Q., Liu, G., Ma, X., Zhang, J. (2023). Three-Dimensional Geologic Modeling. In: Daya Sagar, B.S., Cheng, Q., McKinley, J., Agterberg, F. (eds) *Encyclopedia of Mathematical Geosciences. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-85040-1_328
- [24] Ehsan, M., Latif, M. A. U., Ali, A., Radwan, A. E., Amer, M. A., and Abdelrahman, K. (2023). Geocellular modeling of the cambrian to eocene multi-reservoirs, upper indus basin, Pakistan. *Nat. Resour. Res.* 32 (6), 2583–2607. DOI: 10.1007/s11053-023-10256-7
- [25] Yakovlev, V.L., Glebov, A.V., Bersenyov, V.A., Kulniyaz, S.S., & Ligotskiy, D.N. (2020). Influence of an installation angle of the conveyor lift on the volumes of mining and preparing work at quarries at the cyclic-flow technology of ore mining. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 4(442), 127-137. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.93