

УДК 622.341:658.562.64:519.72

© В.Д. Кантемиров, А.М. Яковлев, Р.С. Титов

В.Д. Кантемиров, А.М. Яковлев, Р.С. Титов

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РУД



Одной из основных современных тенденций горнорудного производства является постоянное снижение кондиций добываемого полезного ископаемого при одновременном росте требований к качеству сырья, поступающего на обогатительный передел, обеспечивающий получение товарной руды для прямой химико-металлургической переработки или кондиционной руды для последующего обогащения [1].

В этих условиях разработки месторождений повышается значение инновационных методов управления качеством добываемого минерального сырья, научно обоснованный выбор и периодический переход на новые эффективные технологии рудоподготовки с учетом изменяющихся горно-геологических условий и режимов отработки карьеров.

Одним из направлений повышения эффективности рудоподготовки минерального сырья является широкое внедрение в практику планирования горных работ горно-геологических информационных систем (ГГИС), с помощью которых можно с высокой достоверностью районировать в карьерном пространстве технологические типы и сорта руд [2].

Технологическим типом руды является руда устойчивого минерального и химического состава, которая перерабатывается по определенной схеме обогащения. Основное условие выделения технологического типа – возможность его раздельной добычи и переработки. Руды каждого технологического типа оконтуривают, подсчитывают, добывают и перерабатывают отдельно. Технологический тип подразделяется на сорта.

Технологический сорт руды – руда, имеющая общую для данного технологического типа схему переработки, но отличающаяся технологическими показателями переработки (например, извлечение, содержание металла в концентрате и т.п.). Исходными данными для моделирования распределения в карьере типов руд являются данные скважин детальной разведки, план подсчета запасов, геологические разрезы, а также карта с координатами разведочных скважин. Данные уточняются по результатам геологической эксплуатационной разведки месторождения

(планирование добычи полезного ископаемого, контроль полноты и качества отработки запасов и др.)

В настоящее время на ряде крупных месторождений, в частности руд черных металлов, как правило, выделяется до 5-6 (табл. 1) технологических типов руды, отличающихся вещественным и минеральными составами, измельчаемостью, крупностью вкрапленности, обогатимостью и другими показателями.

Количественно-качественная оценка массива недр с использованием ГГИС на основе блочного моделирования, математических методов статистики, теории вероятности и теории случайных функций используются для автоматизации процессов планирования в режиме управления качеством минерального сырья.

Для разработки блочных моделей и геометризации качественных характеристик полезного ископаемого (ПИ) используются встроенные в горно-геологические информационные системы (ГГИС) методы интерполяции, реализованные в программных продуктах (ПО Geovia Surpac, Mineframe и др.).

На рис. 1 представлена блок-схема методики геометризации в карьерном пространстве качественных характеристик ПИ.

Краткое описание методики

1. Геометризация качественных характеристик ПИ производится с использованием программных продуктов ГГИС (GEOVIA Surpac, Mineframe, Datamine и др.) на основе сформированной базы исходных данных. База исходных данных для создания блочной модели в ГГИС формируется из данных детальной и эксплуатационной разведки месторождения (участков), геофизического исследования массива, результатов дополнительных минералогических и др. исследований кернов горных пород.

2. Формирование базы исходных данных производится в форматах файлов программ Excel или Access. Производится оценка объема полученных данных и выбор метода их интерпретации в ГГИС для блочного моделирования [3, 4].

Таблица 1

Природные и технологические типы руд Гусевгорского месторождения титаномагнетитов (ОАО «ЕВРАЗ КГОК»)

Natural and technological types of ores Gusevgorское deposits of magnetites (JSC «EVRAZ KGOK»)

Природные типы руд	Содержание основных компонентов, %			Содержание дисперсно-тонковкрапленного титаномагнетита, %		Содержание железа в магнитной фракции при измельчении менее 0,1 мм, %	Технологические типы руды
	Fe	V ₂ O ₅	TiO ₂	дисперсного	дисперсно-тонковкрапленного		
Дисперсно-тонковкрапленные (<0,05 мм)	16,8	0,127	1,13	50-100	75-100	менее 57,8	Весьма труднообогатимые
Тонковкрапленные (0,05-0,2 мм)	17,2	0,140	1,32	20-50	50-75	57,8-60,8	Труднообогатимые
Мелковкрапленные (0,2-1 мм)	17,8	0,150	1,37	6-20	15-50	60,8-62,3	Среднеобогатимые
Средне-тонковкрапленные (1-3 мм)	18,1	0,158	1,43	3-6	5-15	62,3-64,3	Нормальнообогатимые
Крупновкрапленные (>3 мм)	18,1	0,159	1,44	0-3	0-5	64,3-66,8	Легкообогатимые

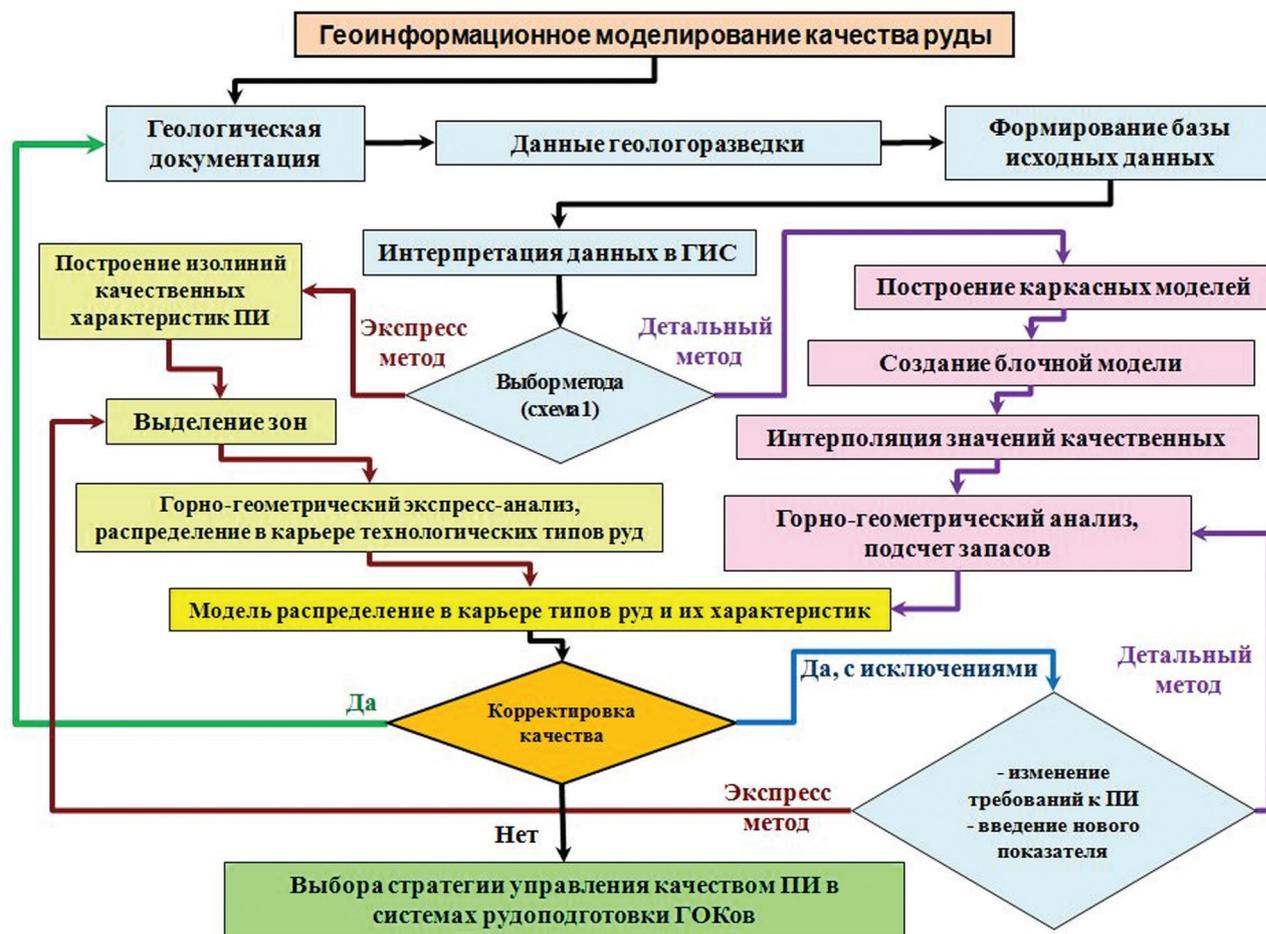


Рис. 1. Блок-схема методики геометризации качественных характеристик ПИ

Fig. 1. Block diagram of the method of geometrization of the qualitative characteristics of the mineral

- Факторы, влияющие на размеры блоков модели:
- плотность разведочной сети и горно-геологические условия разработки месторождения, конфигурация границ рудных тел;
- пространственная изменчивость содержаний полезных компонентов и параметров системы отработки месторождения;
- размеры блоков модели и их соответствие параметрам выемочной единицы (на открытых горных работах высота блока модели принимается кратной высоте уступа в карьере);
- пространственная изменчивость качества ПИ в блочной модели должна учитывать модель вариограммы;
- размеры блока модели должны отражать анизотропию качественных показателей (генеральное направление изменчивости);
- размер основных блоков (ячеек) модели не должен быть меньше половины среднего расстояния между пробами в анализируемом направлении;

– при детализации блочной модели в случаях сложных рудных тел (тонкие линзы, выклинивания рудных тел на флангах, отсутствие четких контактов и т.п.) основные блоки блочной модели разделяются на подъячейки (субблоки).

3. Для интерпретации данных в ГИС предлагается 2 основных метода: экспресс- и детальный методы (см. рис. 1). Оба метода требуют предварительного создания геологической базы данных и позволяют достоверно производить оценку и районирование в карьере руд по качественным признакам. Методы различаются трудоемкостью выполнения, детальностью и возможностью корректировок построенных моделей в зависимости от установленных или изменившихся требований к качеству полезного ископаемого. На рис. 2 представлена блок-схема методики выбора метода моделирования и интерпретации геоданных.

Выбор метода зависит от объема геоданных в сформированной базе, решаемых задач и сроков

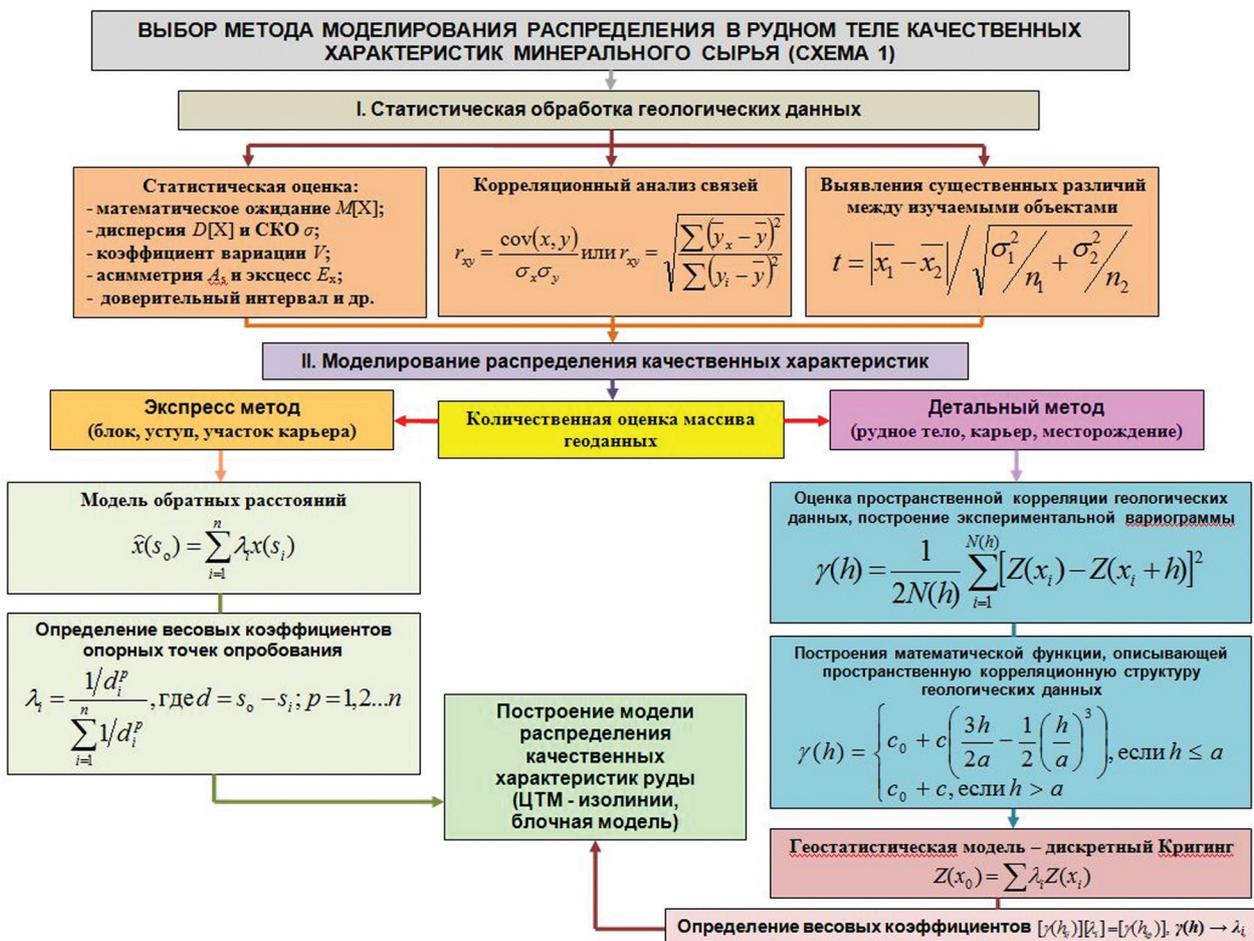


Рис. 2. Блок-схема методики выбора метода моделирования

Fig. 2-Block diagram of the modeling method selection method

их выполнения. Рекомендуется при сравнительно небольшом объеме геоданных (блок, уступ, участок карьера) использовать экспресс-метод на основе метода обратных расстояний (детерминистический способ), при большом объеме исходных данных предлагается использовать детальный метод блочного моделирования на основе методов геостатистики (кригинга с линейной вариограммой).

Достоинства методов геоинформационного моделирования:

- экспресс-метод позволяет оперативно в кратчайшие сроки (в полуавтоматическом режиме, при непосредственном контроле оператора) получить представление об основных закономерностях пространственного размещения полезного ископаемого при минимальном количестве вычислительных операций;
- детальный метод позволяет в автоматическом режиме произвести подсчет запасов на ПК ЭВМ, выделить технологические типы и сорта руд, минимизировать затраты времени на представление результатов, произвести моделирование параметров системы разработки, оценить календарный план и т.п.

Недостатки методов геоинформационного моделирования:

- экспресс-метод при изменениях исходных данных и требований к кондициям ПИ или критериям принадлежности руды к определенному технологическому сорту (содержание полезных и вредных компонентов и др.) предполагает трудоемкую ручную обработку изменившихся зон районирования, а комплексный показатель качества потребует дополнительных расчетов на стадии редактирования геологической базы;
- детальный метод более трудоемкий, т.к. при его применении необходимо произвести большой объем дополнительных исследований и вычислений (геостатистика, создание каркасных моделей, интерполяция в блочную модель и т.п), первоначальные затраты времени превышают по сравнению с экспресс-методом в 5-10 раз.

4. Результатом моделирования обоими методами является модель распределения в карьерном пространстве качественных показателей ПИ и технологических типов руд. Следовательно, оба метода имеют свои области применения в зависимости от типа поставленной задачи и сроков ее выполнения и при необходимости могут дополнять друг друга. Полученная в результате геометризации информация является основой для выбора методов управления качеством минерального сырья.

Основные функции используемых методов интерполяции

Метод обратных расстояний (Inverse Distance to a Power) основан на взвешивании значений рассчитанных (обратных) расстояний между точками опробования с известными значениями качества ПИ и расчетными. Метод позволяет получать результат с меньшими затратами времени и достаточной достоверностью, но в определенных условиях генерирует «артефакт» (ошибку).

По данному методу интерполяция оцениваемой характеристики в искомой точке определяется следующей зависимостью:

$$\hat{x}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i x(s_i), \quad (1)$$

где $\hat{x}(s_0)$ – искомое значение для точки S_0 ;
 λ_i – коэффициент (вес), присвоенные каждой опорной точке, из числа тех, которые будут использованы в вычислениях;
 $x(s_i)$ – измеренное (известное) значение в точке s_i ;
 n – число опорных точек, находящихся в окрестности искомой точки и используемых в вычислениях.

Весовые коэффициенты определяются по следующей формуле:

$$\lambda_i = \frac{1/d_i^p}{\sum_{i=1}^n 1/d_i^p}, \quad (2)$$

где d_i – расстояние между искомой точкой s_0 и i -й опорной точкой s_i , ($d_i = s_0 - s_i$).

С увеличением расстояния вес уменьшается за счет коэффициента p . Параметр степени p влияет на присвоение весов опорным точкам; это означает, что по мере того, как увеличивается расстояние между опорными точками и искомой точкой, влияние (или вес), которое опорная точка будет оказывать на искомую точку, уменьшается по экспоненте.

Метод кригинга (Kriging) – один из наиболее гибких и часто используемых методов. Для большинства множеств экспериментальных данных метод кригинга с линейной вариограммой является наиболее эффективным. Однако на множествах большого размера (масштаб месторождения ПИ) он работает медленнее.

Метод кригинга позволяет получить несмещенную линейную оценку среднего значения пространственно распределенных в рудном теле качественных переменных в точке или блоке с использованием известных результатов опробования как внутри, так и вне оцениваемого объекта.

Задача кригинга состоит в следующем:

- построение экспериментальной и теоретической модели вариограммы,

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2, \quad (3)$$

где $z(x_i)$ – значения качественных характеристик минерального сырья (руды);

$N(h)$ – количество пар $(x_i, x_i + h)$ точек, разделенных расстоянием h ;

- расчет весовых коэффициентов взвешивания λ исследуемого объекта (массива месторождения, блока, рудопотока и т.д.);
- по известным данным $z(x_1), \dots, z(x_N)$, в исследуемом участке оценивается линейная функция неизвестной переменной $Z(x_0)$;
- для оценки неизвестной пространственной переменной $Z(x_0)$ определяется взвешенная средняя величина пространственных данных с известными значениями оцениваемой характеристики (переменной):

$$Z(x_0) = \sum \lambda_i Z(x_i), \quad (4)$$

где λ_i – факторы взвешивания.

С использованием вышеизложенных методов выполнена геометризация качественных характеристик руд в пределах планируемых карьеров перспективных для разработки месторождений: Собственно-Качканарского – титаномагнетитов (рис. 3) и Серовского – комплексных руд (рис. 4), а также моделирование засоренности массива известняков Чаньвинского месторождения (рис. 5) [5].

Геометризация выполнена с использованием данных детальной разведки месторождений, представляющих собой результаты интервального опробования (лабораторных исследований химического состава) кернов пород из разведочных скважин, пробуренных на месторождении с сеткой 50×50 м или 100×100 м.

Исходная геологическая информация переведена в формат специальных электронных таблиц для обработки и интерпретации данных в программных комплексах GEOVIA Surpac, Mineframe и др.

В таблицах содержится информация, необходимая для построения моделей месторождения: данные интервального опробования (содержание ценных и сопутствующих компонентов) по глубине скважины (с интервалом 1-2 м), номер и координаты скважины, высотные отметки устья скважины, номер геологического разреза, глубина скважины, данные инклинометрии (наклон и азимут).

Модели распределения качественных характеристик руд $Z(x_0)$ (рис. 3-5) построены с использованием метода обратно взвешенных расстояний. Интерполяция указанным методом значений содержания компонента производилась взвешиванием величины каждой пробы, обратно пропорциональной

расстоянию от пробы до расчетной точки. При этом значение содержания компонента Z в искомой точке (x_0) определяется на основе оценки значений содержания (x_i) в близлежащих опорных точках и их удаленности от x_0 .

Разработанная методика моделирования качественных характеристик руд с помощью геоинформационных технологий способствуют выявлению сортовых закономерностей в недрах, используемых в процессе планирования горных работ, а также при разработке более эффективной технологии рудоподготовки на горном предприятии. В современных условиях ГГИС с функцией экспресс-анализа перспективного месторождения и детальной информацией о горно-геологических условиях его разработки является необходимым инструментом для предварительных горно-технологических расчетов и экономической оценки целесообразности освоения минеральных ресурсов. Дальнейшие исследования предполагают трансформацию моделей для имитации изменения качественных показателей руды при варьировании параметров системы разработки – высоты подступа, шага подвигания и смены направления фронта горных работ и др.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 075-00581-19-00, тема № 0405-2019-00065 «Разработка методов геоинформационного мониторинга горно-геологических объектов с оценкой состояния горных предприятий как природно-технологических систем».

Ключевые слова: ГИС, горно-геологическая информационная система, качество руд, технологические типы руд, блочное моделирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С., Козлова М.В. Предварительная оценка технологических типов титаномагнетитовых руд // Обогащение руд. – 2018. – № 3. – С. 56-59 (DOI: 10.17580/or.2018.03.10).
2. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М. Возможности компьютерного моделирования для решения вопросов управления качеством минерального сырья [Электронный ресурс] // Проблемы недропользования : сетевое периодическое научное издание / ИГД УрО РАН. – 2016. – № 4. – С. 170-176. – URL: <https://trud.igdur.ru/edition/11> (дата обращения: 12.11.2018).
3. Кузнецов О.Л., Никитин А.А., Черемисина Е.Н. Геоинформатика и геоинформационные системы – М. : ВНИИгеосистем, 2005. – 453 с.
4. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика / под ред. Р.В. Арутюняна ; Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М. : Наука, 2010. – 327 с.

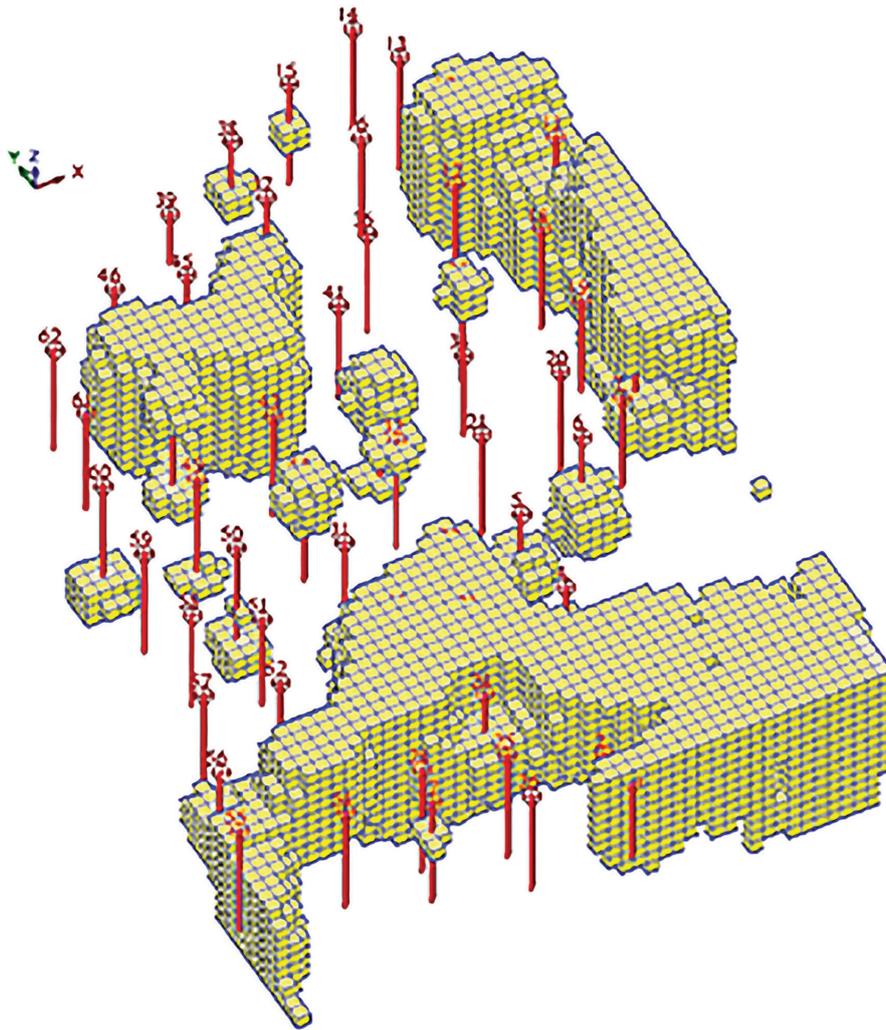


Рис. 5. Блочная модель участка включений глины во взрывном блоке № 1659 (гор. +245 м) Чаньвинского карьера известняков (АО «Березниковский содовый завод»)

Fig. 5. Block model of the area of clay inclusions in the blast block № 1659 (hor. +245 m) Chanvin limestone quarry (JSC «Berezniki soda plant»)

5. Кантемиров В.Д., Тимохин А.В., Титов Р.С. Оценка засоренности массива известняка с использованием методов электроразведки // Маркшейдерия и недропользование. – 2018. – № 2. – С. 21-31.

REFERENCES

1. Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S., Kozlova M.V. Preliminary assessment of the technological types of titanomagnetite ores // Obogashchenie Rud. 2018. No. 3. P. 56-59 (DOI: 10.17580/or.2018.03.10).
 2. Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M. Computer simulation potentialities for solving questions of mineral resources quality management [Electronic resource] // Problems of subsoil use : network periodical

scientific publication / IM UB RAS. 2016. No. 4. P. 170-176. URL: <https://trud.igduran.ru/edition/11> (date of access: 12.11.2018).

3. Kuznetsov O.L., Nikitin A.A., Cheremisina E.N. Geoinformatics and geoinformation systems. Moscow : VNIIGeosistem, 2005. – 453 p.

4. Demyanov V.V., Savelyeva E.A. Geostatistics: theory and practice / Edited by R.V. Arutyunyan ; Nuclear Safety Institute of RAS (IBRAE RAN). Moscow : Science, 2010. – 327 p.

5. Kantemirov V.D., Timokhin A.V., Titov R.S. Debris assessment of limestone massif by the use of geoelectric prospecting // Mine Surveying and Subsurface Use. 2018. No. 2. P. 21-31.