

УДК 553.048(073)

DOI: [10.46698/VNC.2023.90.90.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.90.90.009)

Оригинальная статья

## Объемная цифровая модель глубоких горизонтов Главной рудной залежи Урупского медно-колчеданного месторождения

Г.С. Январёв , Б.Б. Бобмуротов 

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М.И. Платова, Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск,  
ул. Просвещения, 132, e-mail: egor\_yan@list.ru

Статья поступила: 07.02.2023, доработана: 05.03.2023, одобрена в печать: 10.03.2023

**Резюме: Актуальность работы.** Объемное цифровое моделирование тел полезных ископаемых в процессе добычи и эксплуатационной разведки все более активно внедряется в практику работ горнодобывающих предприятий для оперативного планирования и учета движения запасов. В то же время проходка разведочных скважин в разных плоскостях разрабатываемого объема геологического пространства создает сложности в увязке границ рудных тел в межпрофильном пространстве и планировании добычных работ, а использование горно-геологических информационных систем требует от исполнителя отработки определенных алгоритмов последовательного использования инструментов для получения адекватных моделей с учетом уникальных особенностей каждого месторождения, объема и содержания исходных данных. В настоящей работе впервые для глубоких горизонтов Урупского медноколчеданного месторождения построена объемная цифровая модель рудной залежи, иллюстрирующая пространственное распределение содержаний и запасов рудных компонентов. Опыт такой работы может быть полезен специалистам, занимающимся эксплуатационной разведкой. **Цель работы.** Комплексирование инструментария горно-геологической информационной системы «Micromine» для построения объемной модели рудной залежи. Анализ распределения содержаний полезных компонентов и запасов в объеме рудной залежи. Поиск перспективных направлений дальнейшего развития добычных работ. **Методика исследования.** В работе описан пошаговый алгоритм построения цифровой блочной модели Главной рудной залежи Урупского месторождения с использованием штатных инструментов горно-геологической информационной системы «Micromine», таких как условное моделирование (объект «жила»), построение каркасов по линиям геологических границ проецированных на плоскости разрезов, заполнение каркасов блоками с интерполяцией содержаний из проб скважин в центр блока методом обратных взвешенных расстояний. **Результаты исследования.** Построены каркасная и блочная модели глубоких горизонтов Главной рудной залежи месторождения. Подобраны оптимальные размер и ориентация осей эллипсоида поиска для интерполяции содержаний рядовых проб в ячейки блочной модели. Показано распределение содержаний меди, коэффициента зональности  $Zn/(Zn+Cu)$  и запасов в плоских сечениях. Выявлена тенденция приуроченности максимумов запасов в плоскости рудной залежи к зонам, ориентированным с северо-запада на юго-восток, расположенным между ветвями главных тектонических нарушений. В разрезе залежи максимумы запасов образуют «кулисы», ориентированные к литологической границе кровли залежи под углом  $5^\circ$ .

**Ключевые слова:** Урупское месторождение, ГГИС «Micromine», блочная модель, медь, запасы, зональность.

**Для цитирования:** Январёв Г.С., Бобмуротов Б.Б. Объемная цифровая модель глубоких горизонтов Главной рудной залежи Урупского медно-колчеданного месторождения. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): 125-135. DOI: 10.46698/VNC.2023.90.90.009.

DOI: [10.46698/VNC.2023.90.90.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.90.90.009)

Original paper

## Volumetric digital model of deep horizons of the Main ore deposit of the Urupsky copper-crusted deposit

G.S. Yanvarev , B.B. Bobomurotov Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya Str.,  
Novocherkassk 346428, Russian Federation, e-mail: egor\_yan@list.ru

Received: 07.02.2023, revised: 05.03.2023, accepted: 10.03.2023

**Abstract: Relevance.** Volumetric digital modeling of mineral bodies in the process of mining and operational exploration is increasingly being introduced into the practice of mining enterprises for operational planning and accounting of the movement of reserves. At the same time, the penetration of exploration wells in different planes of the developed volume of geological space creates difficulties in linking the boundaries of ore bodies in the interprofile space and planning mining operations, and the use of mining and geological information systems requires the contractor to work out certain algorithms for the consistent use of tools to obtain adequate models, taking into account the unique features of each deposit and the volume and content of the initial data. In this paper, for the first time, a volumetric digital model of an ore deposit illustrating the spatial distribution of the contents and reserves of ore components is constructed for the deep horizons of the Urup copper-crusted deposit. The experience of such work can be useful to specialists engaged in operational exploration. **Aim.** Integration of the tools of the mining and geological information system “Micromine” for the construction of a volumetric model of an ore deposit. Analysis of the distribution of the contents of useful components and reserves in the volume of the ore deposit. Search for promising areas for further development of mining operations. **Methods.** The paper describes a step-by-step algorithm for constructing a digital block model of the Main ore deposit of the Urupskoye deposit using standard tools of the mining and geological information system “Mycromine”, such as conditional modeling (the “vein” object), building frames along the lines of geological boundaries projected on the plane of sections, filling frames with blocks with interpolation of contents from well samples to the center block by the method of inverse weighted distances. **Results.** Frame and block models of deep horizons of the Main ore deposit of the deposit were constructed. The optimal size and orientation of the search ellipsoid axes for interpolating the contents of ordinary samples into the cells of the block model are selected. The distribution of copper contents, zoning coefficient  $Zn/(Zn+Cu)$  and reserves in flat sections is shown. The tendency of the reserve maxima in the plane of the ore deposit to be confined to zones oriented from northwest to southeast, located between the branches of the main tectonic disturbances, has been revealed. In the section of the deposit, the maximum reserves form “wings” oriented to the lithological boundary of the roof of the deposit at an angle of 5°.

**Keywords:** Urupskoe field, MGIS «Micromine», block model, copper, reserves, zonation.

**For citation:** Yanvarev G.S., Bobomurotov B.B. Volumetric digital model of deep horizons of the Main ore deposit of the Urupsky copper-crusted deposit. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(1): 125-135. DOI: 10.46698/VNC.2023.90.90.009.

### Введение

Урупское медноколчеданное месторождение расположено в Лабино-Урупском горнопромышленном центре и является основным эксплуатируемым объектом меди Северного Кавказа [Богущ и др., 2021].

Большинство аналитических работ, опубликованных по месторождению, базируется на информации, полученной при разведке и эксплуатации верхних горизонтов (от 1 до 10) [Скрипченко, 1966; 1972; Савченко, 1973; Hutchinson, 1973; Твалчрелидзе и др., 1979; Смирнов, 1978]. В настоящее время накоплен большой объем информации, полученной при эксплуатации глубоких горизонтов (12–16), который требует обработки с использованием современного инструментария цифрового объемного моделирования и дополнительного анализа.

В настоящей работе впервые для глубоких горизонтов Урупского медноколчеданного месторождения построена объемная цифровая модель Главной рудной залежи, иллюстрирующая пространственное распределение содержаний и запасов рудных компонентов, раскрыта последовательность выполнения операций по построению блочной модели, приведены результаты построений, на основе которых возможно получение новой информации.

### Методы работы

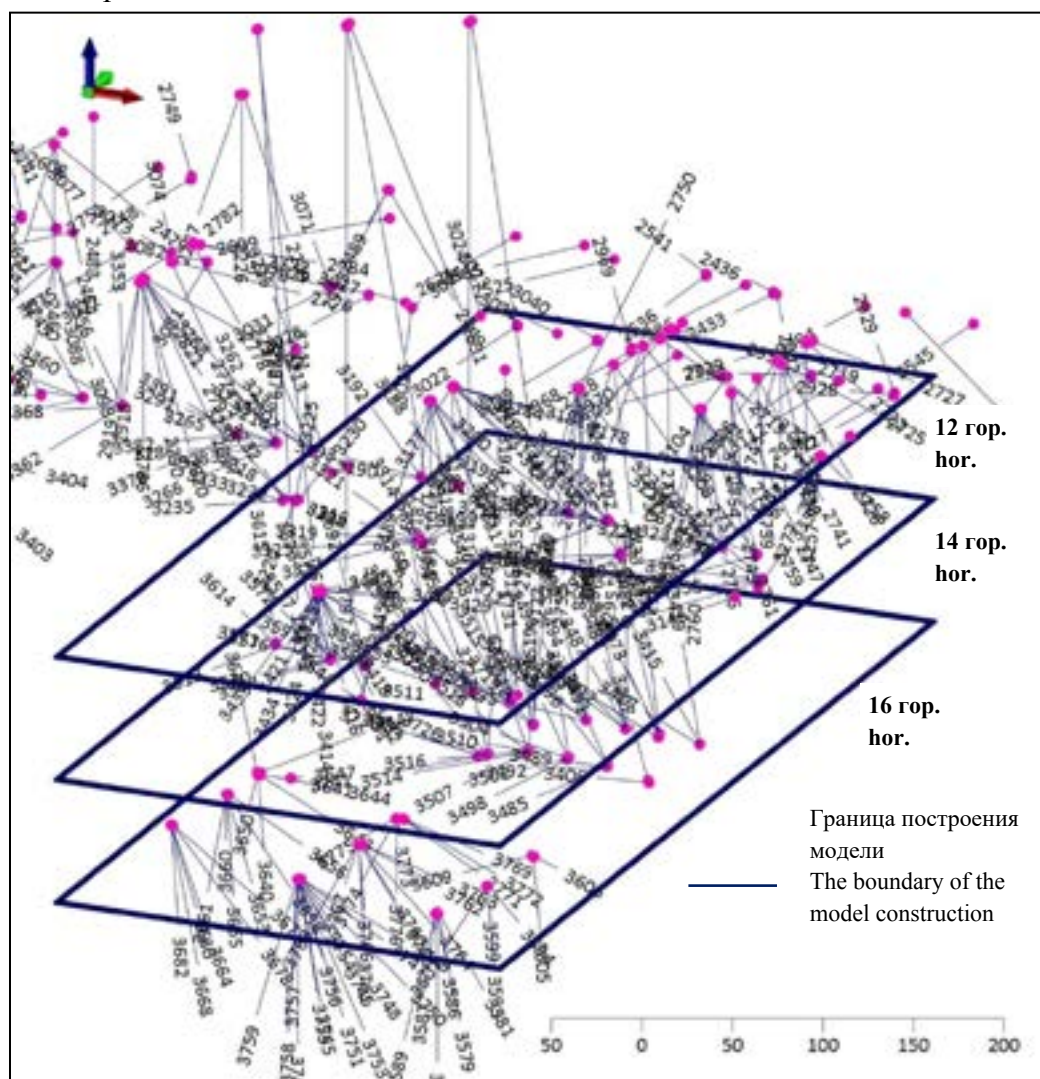
Цифровое моделирование месторождений полезных ископаемых все более активно используется горнодобывающими предприятиями как для оперативного планирования и учета движения запасов, так и для ведения опережающей эксплуатационной разведки [Sides, 1997; Porwal, Carranza, 2015; Zuo et al., 2016; Sun et al., 2019; Mao et al., 2020; Liu, 2022] и других проблем [Zaalishvili et al., 2014a, b; 2016]. В то же время проходка разведочных скважин в разных плоскостях разрабатываемого объема геологического пространства создает сложности в увязке границ рудных тел в межпрофильном пространстве, а использование горно-геологических информационных систем (ГГИС) требует от исполнителя отработки определенных алгоритмов последовательного использования инструментов для получения адекватных моделей с учетом уникальных особенностей каждого месторождения и объема и содержания исходных данных.

Главная залежь Урупского месторождения обобщенно представляет собой линзу массивных колчеданных руд, субсогласных прожилков и рассеянной вкрапленности сульфидов на контакте эффузивных и туфогенно-осадочных пород, падающую на юг под углом 22–25°. В плане это примерно изометричное тело с отношением длины по простиранию к длине по падению 7:6. Исходными данными для построения объемной модели глубоких горизонтов явились 477 скважин эксплуатационной разведки с результатами опробования (3950 проб) и геологической документации. Используются скважины в границах между 0 и 35 разрезами (западный фланг месторождения) на 12–16 горизонтах (рис. 1).

Скважины расположены веерами в диапазоне 360° во всех плоскостях. В таких условиях провести адекватную увязку геологических границ в плоскостях разрезов или горизонтов достаточно сложно. Разрезы и планы геологоразведки представляют собой приблизительный вариант реальной картины.

Для построения объемной модели рудного тела в первую очередь необходимо было установить конфигурацию границ рудной залежи по скважинам эксплуатационной разведки. Кровля руды на месторождении, как правило, резкая, имеет литологический контроль. Подошва рудного тела представлена как сплошными, так и вкрапленными колчеданными рудами. В соответствии с действующими параметрами кондиций для построения модели рудной залежи граница кровли принята по содержанию меди 0,6%. За подошву залежи принята граница опробования с содер-

жанием серы 18%.



*Рис. 1. Исходные данные для построения объемной модели. 3D изображение /  
Fig. 1. Initial data for building a volumetric model. 3D image*

На предприятии плоскости разведочных пересечений (линии разрезов) проведены через 12 м. Соответственно на разрезах выделены интервалы руды по скважинам (штриховки) с окном просмотра «от себя-на себя» 6 м.

Для определения границ подошвы и кровли рудного тела в межскважинном пространстве на первом шаге был построен каркас тела с использованием инструмента условного моделирования «жила» [Федотов, Январёв, 2021], которое является альтернативой традиционному методу. При построении поверхностей кровли и подошвы тела в режиме условного моделирования использован метод радиальных базисных функций. Функции обеспечивают жесткую интерполяцию, но в то же время прогнозируют положение поверхности выше или ниже зафиксированных значений, обеспечивая её минимальную кривизну.

На втором шаге, ориентируясь на тренд изменения границы, установленный в результате применения инструментов условного моделирования, построен каркас рудного тела методом линейной интерполяции по контактам подошвы и кровли, зафиксированным скважинами и спроецированным на плоскость разреза. Необхо-

димось проецирования контактов рудного тела на плоскость разреза обусловлена тем, что при построении каркаса без проекции точек подошвы и кровли руды на плоскость разреза возникают многочисленные пересекающиеся треугольники, избавиться от которых практически невозможно.

Эффективность такого подхода подтверждается практически полным совпадением границ каркаса, построенного по скважинам разведки с границами, установленными по документации горных выработок очистных работ (рис. 2).

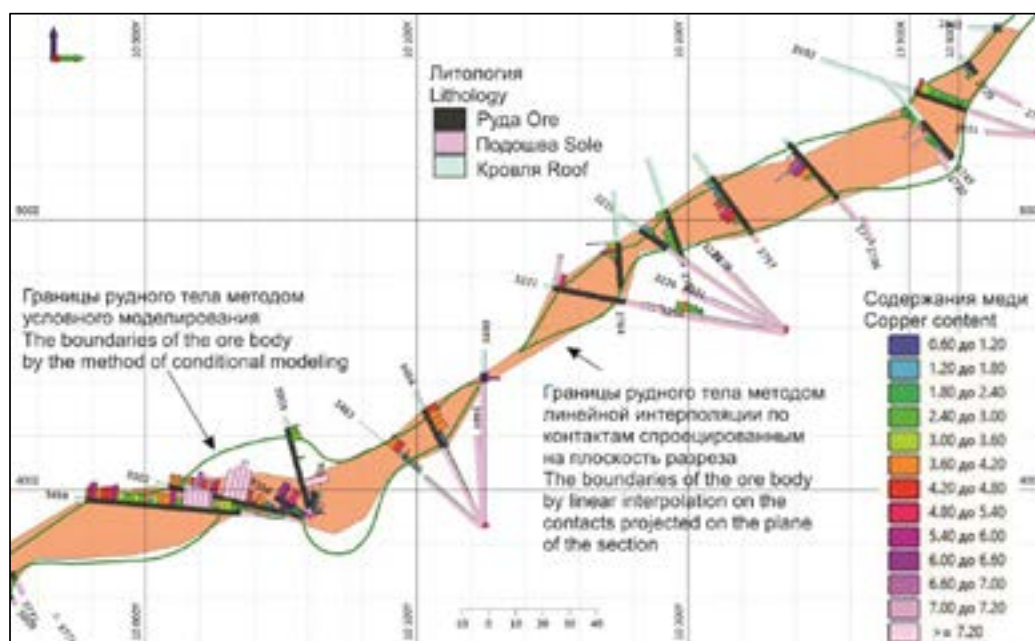


Рис. 2. Каркас Главной рудной залежи Урупского м-ния по 9 профилю (ниже 11 горизонта) /  
Fig. 2. The frame of the Main ore deposit of the Urup mine along the 9th profile (below the 11th horizon)

На заключительном шаге построена блочная модель рудной залежи по итоговому каркасу. Размер блоков 5x5x2 м. Блоки ориентированы длинной стороной вдоль рудной залежи и короткой – по мощности.

Интерполяция содержаний Cu, Zn и S, установленных в пробах скважин эксплуатационной разведки, в блоки осуществлялась методом анизотропных обратных расстояний. Ориентировка эллипсоида скользящего окна выбрана в соответствии с установленной ранее ориентировкой зональности в эксплуатационных блоках [Бобмуротов, 2022], контролируемой палеоструктурой северо-западного простирания [Рябов, 1983]. В соответствии с работой алгоритма для расчета средневзвешенных значений содержаний по блоку использовалось по три пробы из не менее чем трех скважин, расположенных наиболее близко к центру блока. Таким образом, каждый блок отражает средневзвешенное содержание компонента в элементарном объеме рудной залежи и, в то же время, не слишком усредняет содержания с потерей дискретности (рис. 3).

### Результаты работы и их обсуждение

Рудная залежь разбита на многочисленные тектонические блоки разных размеров разрывными нарушениями сбросового и надвигового типа, которые в большинстве случаев рассматриваются как оперяющиеся трещины основных пострудных



разломов [Савченко и др., 1973]. Очевидно, что резкие смещения кровли каркаса и сокращения мощности обусловлены Урупским и Западным разломами. Часть разрывов трактуется как результат растяжения сульфидного тела в процессе гравитационного уплотнения вулканогенно-осадочной среды и накопления деформирующих напряжений в условиях площадного давления на рудный пласт [Скрипченко и др., 2007; Яицкая, Бригида, 2022; Заалишвили и др., 2021]. В подавляющем большинстве случаев амплитуда смещения по таким разрывам не превышает мощности рудной залежи, поэтому при построении каркаса они не учитывались.

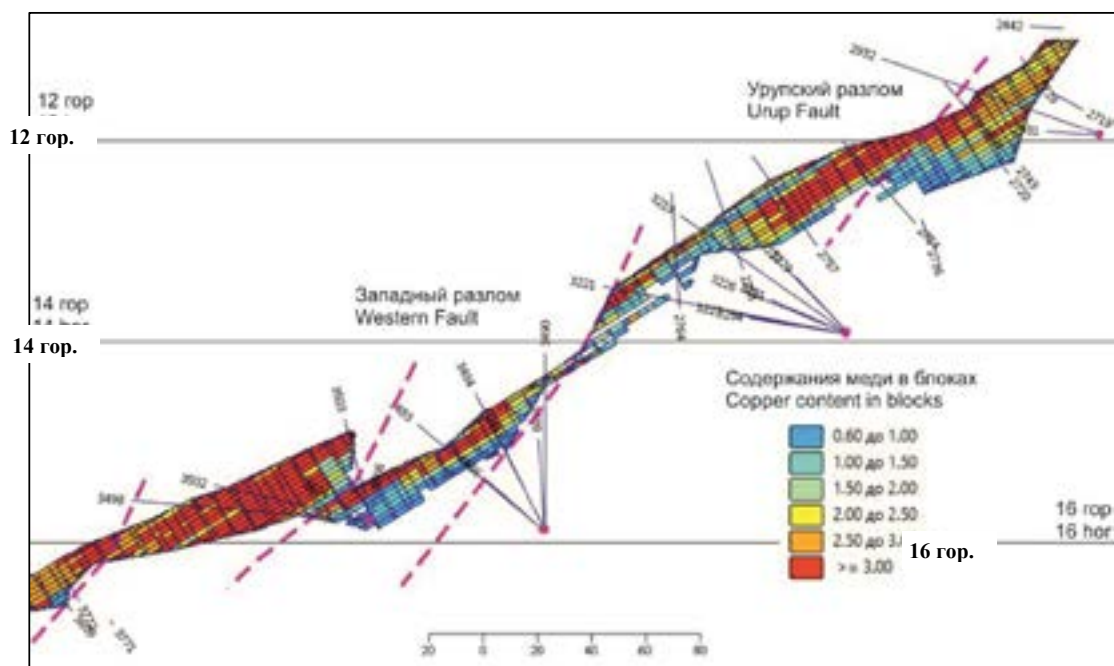


Рис. 3. Блочная модель распределения содержаний Cu (%) в Главной рудной залежи Урупского м-ния по 9 профилю (ниже 11 горизонта) /

Fig. 3. Block model of distribution of Cu contents (%) in the Main ore deposit of the Urupskoye mine along profile 9 (below horizon 11)

Зональность колчеданных месторождений, – одна из их важнейших характеристик, позволяющая судить о генезисе и эффективно проводить разведку и планировать движение запасов. Анализ большого количества колчеданных месторождений различного состава и строения позволил установить общие черты их зональности [Логинов, 1974 и др.] и наметить типовой ряд зональности рудных элементов, имеющий вид: Fe (Co) → Fe, Cu (Au) → Zn, Pb (Au, Ag) [Рундквист, Неженский, 1975].

В целом для верхних горизонтов Главной залежи месторождения установлены поперечная и латеральная зональности [Резников, 1981; Рябов, 1983; Skripchenko, 1986]. В поперечном разрезе залежи закономерно возрастает содержание меди в направлении от подошвы к кровле с резким падением концентрации на верхнем контакте, что связано с диагенетическим окислительным воздействием водной среды, перекрывающей рудную залежь на момент ее образования. Блочная модель глубоких горизонтов в целом подтверждает эту закономерность (см. рис. 3). Но в отличие от типового ряда зональности, коэффициент зональности  $Zn/(Cu+Zn)$ , рассчитанный по блочной модели, показывает на относительное обогащение цинком подошвы залежи (рис. 4).

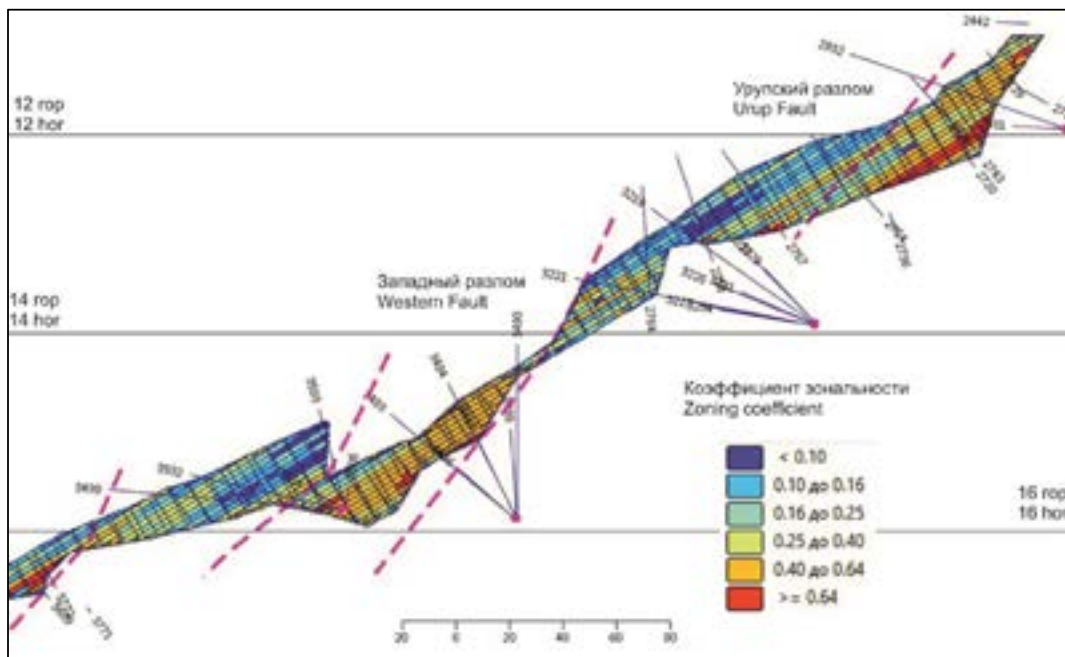


Рис. 4. Блочная модель распределения  $Zn/(Cu+Zn)$  в Главной рудной залежи Урупского м-ния по 9 профилю (ниже 11 горизонта) /

Fig. 4. Block model of  $Zn/(Cu+Zn)$  distribution in the Main ore deposit of the Urupskoye mine along profile 9 (below horizon 11)

В то же время следует отметить, что блочная модель может отражать не только содержание меди, но и ее запасы с учетом объемной массы по классам содержаний серы (рис. 5).

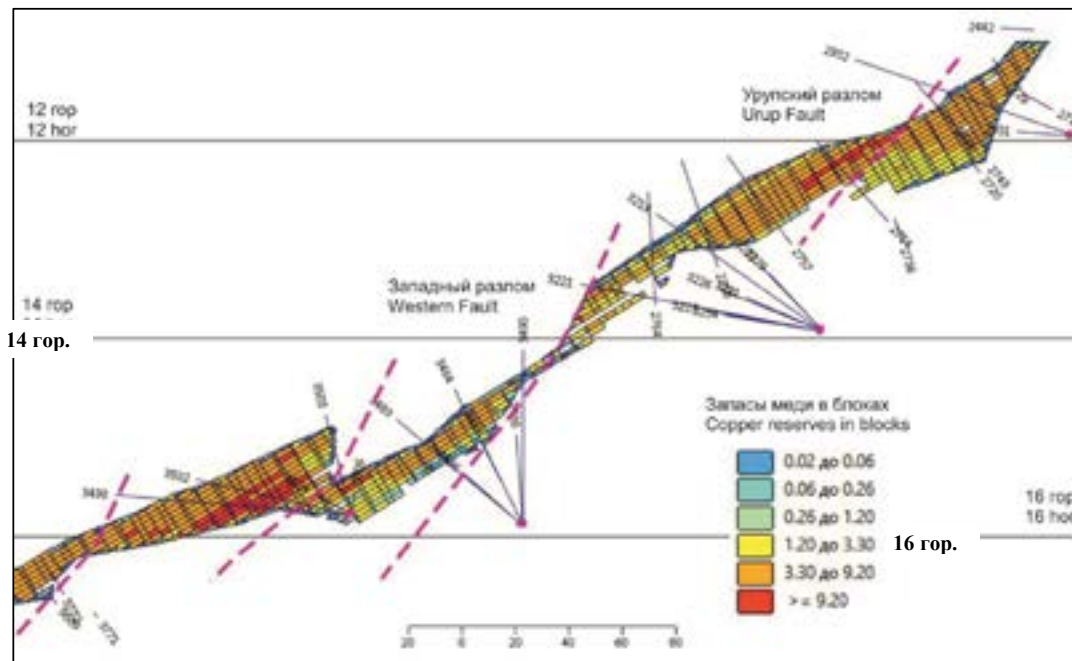


Рис. 5. Блочная модель распределения запасов  $Cu$  в тоннах в Главной рудной залежи Урупского м-ния по 9 профилю (ниже 11 горизонта) /

Fig. 5. Block model of distribution of  $Cu$  reserves in tons in the Main ore deposit of the Urupskoye mine along profile 9 (below horizon 11)

В этом аспекте для планирования горных работ блочная модель распределения запасов представляет гораздо больший интерес, чем графики распределения содержаний, показанные на рисунке 2.

Создание блочной объемной модели рудной залежи позволяет проследить поведение интерполируемых показателей в любых плоскостях. Как в плоскостях разрезов и погоризонтных планов, принятых на предприятии, так и в плоскостях, ориентированных вкрест простирания Урупского разлома (с юго-запада на северо-восток).

Построение системы таких разрезов позволило выявить следующие закономерности:

1. Содержание меди в пределах Главной залежи в целом закономерно возрастает в направлении от подошвы к кровле, но максимумы содержаний образуют «чешуи», косо ориентированные к литологической границе рудного тела под углом около 5°. Аналогичным образом ведут себя запасы меди, причем максимумы запасов смещены вниз относительно кровли на 2–5 метров.

2. Распределение цинка по мощности залежи более равномерно и беспорядочно, но отношение содержаний цинка к сумме содержаний металлов показывает более высокие значения этого коэффициента в подошве залежи.

3. В плане максимумы и минимумы запасов образуют полосы, ориентируемые в соответствии с генеральным простиранием основных разломов (с северо-запада на юго-восток), причем максимумы запасов располагаются между ветвями главных тектонических нарушений. Исходя из этого, большее количество запасов следует ожидать на восточном продолжении залежи между 16 и 17 горизонтами в интервале разрезов 0–10.

### Выводы

Использование штатных инструментов ГГИС «Micromine» в рекомендуемой последовательности (построение предварительного каркаса рудного тела способом условного моделирования «жила», корректировка каркаса способом линейной интерполяции по контактам, спроецированным на плоскость разреза, построение блочной модели по итоговому каркасу) позволяет получить картину распределения рудных компонентов и их соотношений в разноориентированных сечениях рудного тела.

Установлен характер распределения Cu, Zn и запасов по элементарным блокам в объеме рудной залежи, что может быть использовано для оперативного планирования добычных работ.

Дальнейшее развитие добычных работ за границами исследуемой области рекомендуется сосредоточить на 16-17 горизонтах в интервале между 0 и 10 разрезами.

### Литература

1. Богуш И.А., Рябов Г.В., Бурцев А.А. Колчеданы Северного Кавказа. Перспективы рудоносности Худесского месторождения. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 6–16. DOI:10.46698/VNC.2021.80.87.001
2. Бобомуротов Б.Б. Пространственное распределение меди и цинка в Главной рудной залежи Урупского медноколчеданного месторождения, Северный Кавказ. // Металлогения древних и современных океанов-2022. От вещественного состава к моделям и прогнозированию месторождений. Научное издание. – Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2022. – 248 с.
3. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №4. С. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006



4. Логинов В. П. Эндогенная зональность колчеданных месторождений. // Зональность гидротермальных рудных месторождений. Т. II. – М.: Наука, 1974. – С. 7–85.
5. Резников Н.В. Зональность Урупских медноколчеданных месторождений. // Гелог. рудн. месторожд. – 1981. – №3. – С. 30–40.
6. Рундквист Д.В., Неженский Н.А. Зональность эндогенных рудных месторождений. – Л.: Недра, 1975. – 224 с.
7. Рябов Г.В. Зональность Урупского колчеданного месторождения. // Геология рудных месторождений. – 1983. – №5. – С. 102–108.
8. Савченко Н.А., Скрипченко Н.С., Тамбиев А.С. Урупский рудный район. / В кн. Колчеданные месторождения Большого Кавказа. – М.: Недра, 1973. – С. 75–100.
9. Скрипченко Н.С., Андреева О.В., Прядка Р.Д. Сколовое косослоистое будинирование пластовых колчеданных залежей урупского типа: научное издание. // Геодинамические и генетические модели рудных месторождений. – Ростов н/Д: Юж. науч. центр РАН, 2007. – С. 223–230.
10. Скрипченко Н.С. Вулканогенно-осадочное рудообразование (на примере колчеданных месторождений Северного Кавказа). – М.: Недра, 1966. – 291 с.
11. Скрипченко Н.С. Гидротермально-осадочные сульфидные руды базальтоидных формаций. – М.: Недра, 1972. – 214 с.
12. Смирнов В.И. Рудные месторождения СССР. В 3-х т. Изд. 2-е, перераб. и доп. Т. 2. – М.: Недра, 1978. – 399 с.
13. Твалчрелидзе А.Г., Ярошевич В.З., Нарозаули Н.Г. Генетическая модель Урупского медноколчеданного месторождения. // Геол. рудн. месторожд. – 1979. – №6.
14. Федотов Г.С., Январев Г.С. Объемное цифровое моделирование геологических тел в процессе разведки: учебное пособие. – М.: Издательство «Горная книга», 2021. – 168 с.
15. Яицкая Н.А., Бригида В.С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.
16. Sides E. Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. // Geol Rundsch. – 1997. – Vol. 86. – pp. 342–353. DOI: 10.1007/s005310050145
17. Sun Tao, Chen Fei, Zhong Lianxiang, Liu Weiming, Wang Yun GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: A case study from Tongling ore district, eastern China. // Ore Geology Reviews. – 2019. – Vol. 109. – pp. 26-49. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.04.003.
18. Hutchinson R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. // Economic Geology. – 1973. – Vol. 68. – pp. 1223–1246.
19. Liu Y., Carranza E.J.M., Xia, Q. Developments in Quantitative Assessment and Modeling of Mineral Resource Potential: An Overview. // Nat Resour Res. – 2022. – Vol. 31. – pp. 1825–1840. DOI: 10.1007/s11053-022-10075-2
20. Mao X., Zhang W., Liu Z., Ren J., Bayless R. C., Deng, H. 3D mineral prospectivity modeling for the low-sulfidation epithermal gold deposit: A case study of the Axi gold deposit, western Tianshan, NW China. // Minerals. – 2020. – Vol. 10(3). – pp. 1–21.
21. Porwal A., Carranza E.J.M. Introduction to the Special Issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration. // Ore Geology Reviews. – 2015. – Vol. 71. – pp. 477–483.
22. Skripchenko N.S., Shcheglov V.I., Ryabov G.V., Andreev V.L. Zonung of massive sulfide deposits and their origin: Geology and metallogeny of copper deposits. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 1986. – pp. 350-357.
23. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2014a. – Vol. 50(2). – pp. 263–272.

24. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014b. – Vol. 50(5). – pp. 707–718.

25. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. // *International Journal of GEOMATE*. – 2016. – Vol. 10(1). – pp. 1656–1661.

26. Zuo R., Carranza E.J.M., Wang J. Spatial analysis and visualization of exploration geochemical data. // *Earth Science Reviews*. – 2016. – Vol. 158. – pp. 9–18.

## References

1. Bogush I.A., Ryabov G.V., Burtsev A.A. Pyritic deposits of North Caucasus. Prospects of minerality of Hudes deposit. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.3. pp. 6–16. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.80.87.001.

2. Bobomurotov B.B. Spatial distribution of copper and zinc in the Main ore deposit of the Urup-sky copper pyrite deposit, North Caucasus. *Metallogeny of ancient and modern oceans-2022. From material composition to models and forecasting of deposits*. Scientific publication. Miass, YuU FNTs MiG Ural Branch of the RAS, 2022. 248 p. (in Russ.)

3. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikin T.I. Nonlinear vibrations of soil strata according to instrumental and numerical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.4. pp. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006 (in Russ.)

4. Loginov V.P. Endogenous zoning of pyrite deposits. *Zoning of hydrothermal ore deposits*. Vol. II. Moscow. Nauka, 1974. pp. 7–85. (in Russ.)

5. Reznikov N.V. Zoning of the Urup copper sulfide deposits. *Geology of ore deposits*. 1981. No.3. pp. 30–40. (in Russ.)

6. Rundkvist D.V., Nezhensky N.A. Zoning of endogenous ore deposits. Leningrad. Nedra, 1975. 224 p. (in Russ.)

7. Ryabov G.V. Zoning of the Urup pyrite deposit. *Geology of ore deposits*. 1983. No.5. pp. 102–108. (in Russ.)

8. Savchenko N.A., Skripchenko N.S., Tambiev A.S. Urup ore district. In the book. *Pyrite deposits of the Greater Caucasus*. Moscow. Nedra, 1973. pp. 75–100. (in Russ.)

9. Skripchenko N.S., Andreeva O.V., Pryadka R.D. Cleavage cross-layered boudinage of layered pyrite deposits of the Urup type: scientific publication. *Geodynamic and genetic models of ore deposits*. Rostov on Don. SSC RAS. 2007. pp. 223–230. (in Russ.)

10. Skripchenko N.S. Volcanogenic-sedimentary ore formation (on the example of pyrite deposits of the Northern Caucasus). Moscow. Nedra. 1966. 291 p. (in Russ.)

11. Skripchenko N.S. Hydrothermal-sedimentary sulfide ores of basaltoid formations. Moscow. Nedra. 1972. 214 p. (in Russ.)

12. Smirnov V.I. Ore deposits of the USSR. In 3 volumes. Ed. 2nd, updated and revised. Vol. 2. Moscow. Nedra. 1978. 399 p. (in Russ.)

13. Tvalchrelidze A.G., Yaroshevich V.Z., Narozauli N.G. Genetic model of the Urup copper pyrite deposit. *Geology of ore deposits*. 1979. No.6. (in Russ.)

14. Fedotov G.S., Yanvarev G.S. Volumetric digital modeling of geological bodies in the process of exploration: a tutorial. Moscow. Gornaykniga. 2021. 168 p. (in Russ.)

15. Yaitskaya N.A., Brigida V.S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geocological problems. Spatial data interpolation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.1. pp. 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012. (in Russ.)

16. Sides E. Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. *Geol Rundsch*. 1997. Vol. 86. pp. 342–353. DOI: 10.1007/s005310050145

17. Sun Tao, Chen Fei, Zhong Lianxiang, Liu Weiming, Wang Yun GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: A case study from Tongling ore district, eastern China. *Ore Geology Reviews*. 2019. Vol. 109. pp. 26–49. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.04.003.

18. Hutchinson R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. *Economic Geology*. 1973. Vol. 68. pp. 1223–1246.
19. Liu Y., Carranza E.J.M., Xia, Q. Developments in Quantitative Assessment and Modeling of Mineral Resource Potential: An Overview. *Nat Resour Res*. 2022. Vol. 31. pp. 1825–1840. DOI: 10.1007/s11053-022-10075-2
20. Mao X., Zhang W., Liu Z., Ren J., Bayless R. C., Deng, H. 3D mineral prospectivity modeling for the low-sulfidation epithermal gold deposit: A case study of the Axi gold deposit, western Tianshan, NW China. *Minerals*. 2020. Vol. 10(3). pp. 1–21.
21. Porwal A., Carranza E.J.M. Introduction to the Special Issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 71. pp. 477–483.
22. Skripchenko N.S., Shcheglov V.I., Ryabov G.V., Andreev V.L. Zonung of massive sulfide deposits and their origin: Geology and metallogeny of copper deposits. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1986. pp. 350–357.
23. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014a. Vol. 50(2). pp. 263–272.
24. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014b. Vol. 50(5). pp. 707–718.
25. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10(1). pp. 1656–1661.
26. Zuo R., Carranza E.J.M., Wang J. Spatial analysis and visualization of exploration geochemical data. *Earth Science Reviews*. 2016. Vol. 158. pp. 9–18.