ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья
https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-192-202
УДК 553.98

Оценка перспективности территории Березкинского рудного поля при помощи программного продукта Micromine

И.И. Босиков[1], **Р.В. Клюев**[2] ✉

[1] *Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), г. Владикавказ, Российская Федерация*

[2] *Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация*

✉ *kluev-roman@rambler.ru*

Аннотация

Важнейшим направлением проведения комплексных исследований по определению перспектив месторождений различных руд является использование современных компьютерных методов, в частности, программного продукта Micromine. В статье рассматривается Березкинское рудное поле, для которого произведены анализ перспектив и подсчет запасов для открытого и подземного способов отработки. При этом определены запасы серебра в качестве основного полезного компонента, а также рассчитаны балансовые запасы раздельно для всех типов руд в контуре оптимального карьера, принятого в технико-экономическом обосновании постоянных разведочных кондиций для разработки руд. Для векторизации и проверки геологической информации, вводимой в базу данных, при помощи программного обеспечения Micromine в пространственных координатах были привязаны графические материалы в виде планов разрезов с наложенной базой данных скважин. Конечной проверкой являлся контроль на соответствие глубины введенной информации относительно глубины выработки. База данных содержит информацию о местоположении выработок (скважин, канав), конструкции скважин, информацию с описанием пространственного положения оси выработок, данные с результатами опробования выработок на серебро и медь. Для подземного способа отработки оконтуривание рудных тел проводилось по сечениям, выделенным в скважинах по бортовому содержанию 10,7 г/т, с учетом ориентировки геологических структур. Надежность увязки рудных залежей проверялась в трехмерной модели, построенной в программе Micromine. Для условий открытой отработки в процессе эксплуатации возможно уточнение положения мелких рудных тел эксплуатационной разведкой и перевод их в более высокие категории. Построение каркасной модели рудных зон и тел производилось с использованием контуров по разработанной методике. В основу построения каркасной модели разломов положены планы и разрезы участка Березкинский. Построение каркасной модели разломов проводилось в несколько этапов. Применение современных геоинформационных систем (ГИС) технологий позволяет качественно провести оценку перспективности и подсчет запасов на месторождениях. На Березкинском месторождении изучены вещественный состав руд, технологические свойства, гидрогеологические и инженерно-геологические особенности месторождений.

Ключевые слова

рудное поле, программный продукт Micromine, серебро, месторождение, скважина, оконтуривание рудоносных залежей, открытый и подземный способ отработки полезных ископаемых, перспективность

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.И. Голику, В.Б. Заалишвили и другим специалистам в области проведения оценки рудных месторождений с помощью геоинформационных технологий за содействие во внедрении полученных научных и практических результатов исследований.

Для цитирования

Bosikov I.I., Klyuev R.V. Assessment of Berezkinskoye ore field prospectivity using Micromine software. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2022;7(3):192–202. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-192-202

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research paper

Assessment of Berezkinskoye ore field prospectivity using Micromine software

I.I. Bosikov[1], **R.V. Klyuev**[2] ✉

[1] *North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (STU), Vladikavkaz, Russia*

[2] *Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

✉ *kluev-roman@rambler.ru*

Abstract

The use of modern computer aided methods, in particular the use of the Micromine software, is an important part of the integrated research for the determination of deposit prospects for various ores. The paper is devoted to the analysis of prospects and estimation of reserves for open-pit and underground mining in

© Босиков И. И., Клюев Р. В., 2022

the Berezkinskoye ore field. For this purpose, silver reserves were determined as the principal valuable component. The deposit balance reserves were estimated separately for all types of ores in the optimal open pit envelope adopted in the final mining feasibility study (FS of permanent exploration conditions for ore extraction). To vectorize and verify the geological information entered into the database, graphical materials in the form of cross-sections and plans with the corresponding borehole database were georeferenced using the Micromine software. The final inspection was carried out to ensure that the sample depth information entered was consistent with the excavation depth. The database contains information on the location of boreholes and trenches, the design of boreholes, the spatial positioning of the boreholes/trenches axes, the data of sample assays for silver and copper. For underground mining, the delineation of ore bodies was carried out based on the cross-sections identified in the boreholes at a cut-off grade of 10.7 g/t, taking into account the orientation of geological structures. Reliability of the ore bodies delineation was verified in a Micromine three-dimensional model. For open-pit mining, the position of small ore bodies may be clarified by operational exploration with possible subsequent upgrading their reserve categories. The wireframe model of ore zones and bodies was constructed using the outlines obtained by the developed methodology. A wireframe model of faults was based on the Berezkinsky area plans and cross-sections. The construction of the fault wireframe model was performed in several steps. Application of modern geoinformation system (GIS) technologies makes it possible to qualitatively assess the prospects and estimate the reserves at the deposits. The Berezkinskoye deposit ore material composition, metallurgical properties, hydrogeological and geotechnical features were investigated.

Keywords
ore field, Micromine software, silver, deposit, borehole, delineation of ore bodies, open-pit and underground mining, mineral, prospectivity

Acknowledgements
The authors are grateful to V.I. Golik, V.B. Zaalishvili and other specialists in the field of ore deposit evaluation by means of GIS technologies for their assistance in implementation of the obtained scientific and practical research findings.

For citation
Bosikov I.I., Klyuev R.V. Assessment of Berezkinskoye ore field prospectivity using Micromine software. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2022;7(3):192–202. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-192-202

Введение

По минералогическому составу руды Березкинского рудного поля относятся к серебро-сульфидно-кварцевой формации с прожилково-вкрапленной минерализацией Серебряное оруденение [1, 2] представлено прожилково-вкрапленной и гнездовой сульфидной минерализацией [3] в метасоматически измененных породах: кварц-серицитовых и серицито-кварцевых метасоматитах и вторичных кварцитах, реже в серицитизированных и окварцованных порфиритах и андезитах.

Содержание серебра в рудных пересечениях колеблется в широких пределах и крайне неравномерное.

Месторождение разведано системой вертикальных, наклонных скважин и канав, которые расположены крайне неравномерно. Для участков Южный и Восточный наиболее детально оруденение изучено в пределах развития коры выветривания, которая пересечена на всю мощность многочисленными скважинами, а по поверхности прослежена канавами. Глубокие горизонты изучены хуже, скважинами по нерегулярной сети.

Методы исследований

Наиболее точным способом определения запасов является метод геологических блоков [4, 5] с использованием коэффициента рудоносности как для руд, размещенных в коре выветривания, так и для руд, размещенных ниже коры выветривания.

Обсуждение результатов

Подсчет запасов проведен в соответствии с постоянными разведочными кондициями для открытого способа отработки [6, 7]. При этом необходимо рассчитать запасы серебра в качестве попутного компонента, а также вычислить балансовые запасы раздельно для всех типов руд в контуре оптимального карьера [8, 9], принятого в технико-экономическом обосновании (ТЭО) постоянных разведочных кондиций для разработки руд.

Подсчет запасов проведен в соответствии с временными разведочными кондициями для подземного способа отработки и предусматривает также расчеты запасов серебра в качестве попутного компонента. При этом к забалансовым рудам следует отнести запасы, подсчитанные по кондициям балансовых руд, но не соответствующие нормам промышленного минимума.

В табл. 1 представлены минимальные запасы руды изолированных тел.

Исходные материалы для подсчета запасов

Исходными материалами при подсчете запасов являлись:

1. Каталог координат устьев скважин и канав (база данных).
2. Журналы документаций буровых скважин.
3. Результаты лабораторных анализов рядовых проб, а также результаты определения объемной массы и влажности руд.

По исходным материалам была составлена база данных (БД), в которую была введена вся информация по пройденным выработкам за 2022 г.

Все данные представлены в виде сканированных материалов и электронных таблиц в формате Excel (каталоги координат, инклинометрия, результаты лабораторных исследований). Все данные проверялись, вносились исправления, приводились к единой структуре. Сканированная информация оцифровывалась, проверялась, добавлялась в базу данных.

База данных содержит все необходимые данные для подсчетов запасов месторождения Березкинское.

4. Геологические карты, планы и разрезы Березкинских участков масштаба 1 : 1000 и 1 : 500.

Сканированные графические материалы в виде планов разрезов привязывались припомощи программного обеспечения (ПО) Micromine [10, 11] в пространственных координатах (рис. 1). Графические материалы применялись для интерпретации, векторизации и проверки геологической информации, вводимой в базу данных.

Формирование базы данных

Обработанные первичные данные обобщались при помощи программного продукта Micromine (рис. 2). Правильность ввода и обработки проверялась визуально и посредством инструментов программы. Конечной проверкой являлся контроль на соответствие глубины введенной информации относительно глубины выработки. База данных содержит информацию о местоположении выработок (скважин, канав), конструкции скважин, информацию с описанием пространственного положения оси выработок, данные с результатами опробования выработок на серебро и медь (рис. 2). Структура базы данных представлена в табл. 2.

Опробование

В таблицу «опробование» вводились результаты анализов проб, выполненные за 2022 г. Всего на месторождении отобрано 122 пробы (в т.ч. контрольное опробование), из них 95 проб из керна разведочных скважин и 27 бороздовых проб из канав.

Таблица 1

Минимальные запасы руды изолированных тел

Содержание Ag в рудном теле, г/т	Минимальные запасы руды изолированных тел, тыс. т, включаемых в подсчет запасов при расстояниях от основного рудного тела						
	50	75	100	125	150	175	200
6,57	3,01	4,51	6,01	7,52	9,02	10,53	12,03
7,00	2,04	3,05	4,07	5,09	6,11	7,13	8,14
7,50	1,48	2,22	2,96	3,70	4,44	5,19	5,93
8,00	1,16	1,75	2,33	2,91	3,49	4,08	4,66
8,50	0,96	1,44	1,92	2,40	2,88	3,36	3,84
9,00	0,82	1,22	1,63	2,04	2,45	2,85	3,26
9,50	0,71	1,06	1,42	1,77	2,13	2,48	2,84

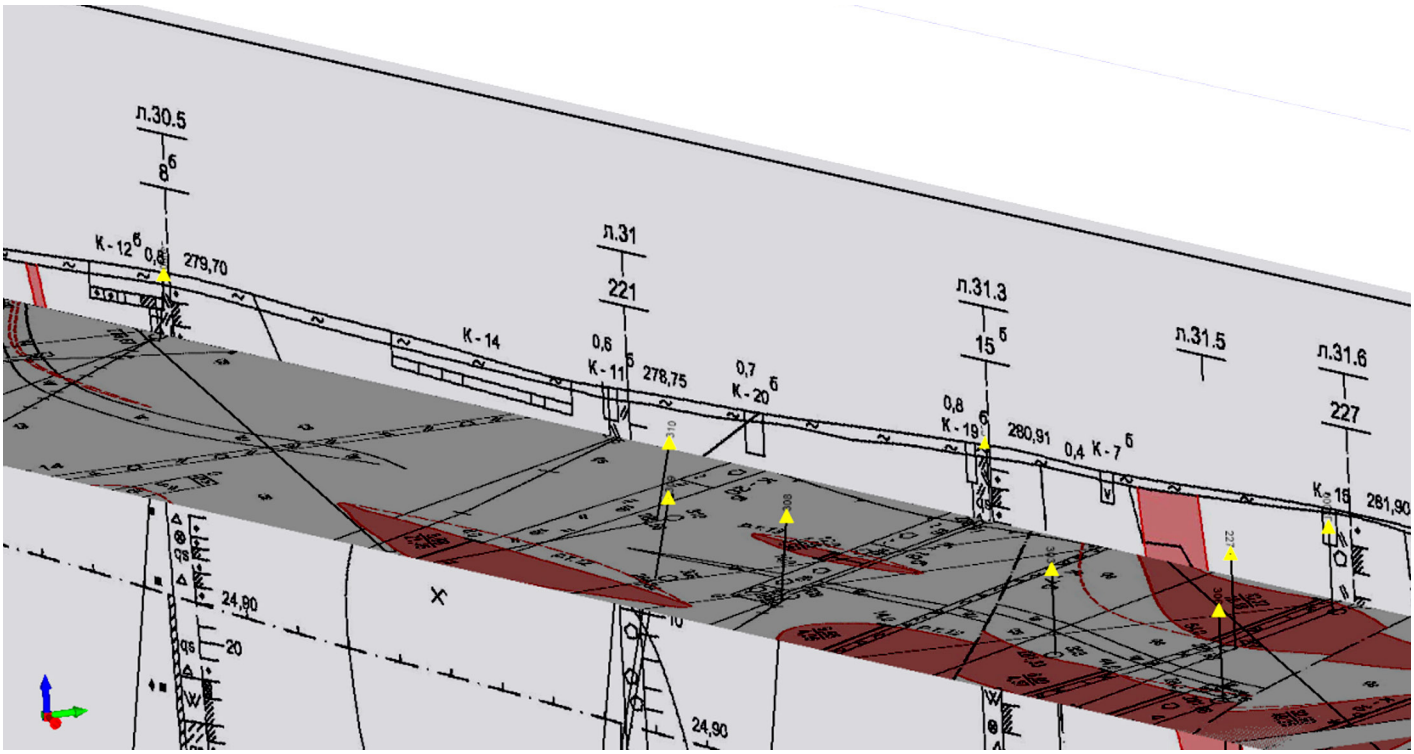


Рис. 1. Привязанный план и разрез по профилю 128, участок Березкинский, с наложенной базой данных скважин

Проведенная проверка показала, что база данных содержит дубликаты, которые были удалены. Значения содержаний включали «0», а также кодированные отрицательные значения, которые были заменены на величину, равную половине чувствительности анализа 0,1 г/т для Ag.

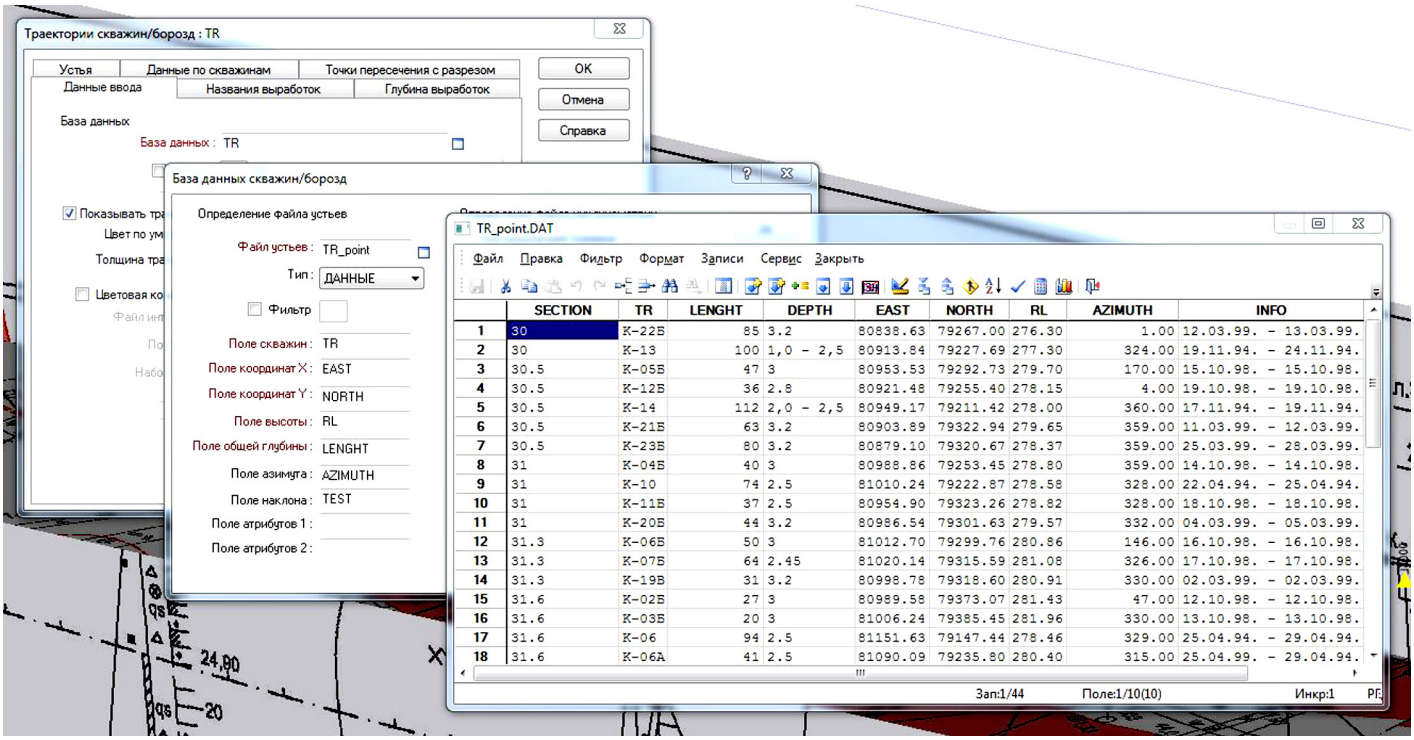
База данных содержит 22 интервала, из которых данные опробования имеются по 82 интервалам Ag.

Принципы оконтуривания

Оконтуривание рудоносных залежей для открытого способа отработки проводилось по крайним сечениям, выделенным в скважинах по бортовому содержанию 0,4, с учетом ориентировки геологических структур. Надежность увязки рудных залежей проверялась в трехмерной модели [12, 13], построенной в программе Micromine.

Оконтуривание рудоносных залежей проведено с учетом контуров карьеров; блоки, вошедшие в контур карьера, были отнесены к балансовым запасам, не вошедшие – к забалансовым. При подсчете запасов, в случае когда блок делится контуром карьера на две части, рудные тела оконтуривались на разрезах раздельно по границе карьера [14]. Участок рудного тела, выходящий за контур карьера, но опирающийся на выработку внутри карьера, в расчет забалансовых запасов не включался. Аналогично участок тела, попадающий в контур карьера, но опирающийся на выработку за контуром карьера, в подсчет балансовых запасов не включался.

Для подземного способа отработки оконтуривание рудных тел проводилось по сечениям, выделенным в скважинах по бортовому содержанию 10,7, с учетом ориентировки геологических структур [15].



	SECTION	TR	LENGHT	DEPTH	EAST	NORTH	RL	AZIMUTH	INFO
1	30	К-22Б	85	3.2	80838.63	79267.00	276.30	1.00	12.03.99. - 13.03.99.
2	30	К-13	100	1,0 - 2,5	80913.84	79227.69	277.30	324.00	19.11.94. - 24.11.94.
3	30.5	К-05Б	47	3	80953.53	79292.73	279.70	170.00	15.10.98. - 15.10.98.
4	30.5	К-12Б	36	2.8	80921.48	79255.40	278.15	4.00	19.10.98. - 19.10.98.
5	30.5	К-14	112	2,0 - 2,5	80949.17	79211.42	278.00	360.00	17.11.94. - 19.11.94.
6	30.5	К-21Б	63	3.2	80903.89	79322.94	279.65	359.00	11.03.99. - 12.03.99.
7	30.5	К-23Б	80	3.2	80879.10	79320.67	278.37	359.00	25.03.99. - 28.03.99.
8	31	К-04Б	40	3	80988.86	79253.45	278.80	359.00	14.10.98. - 14.10.98.
9	31	К-10	74	2.5	81010.24	79222.87	278.58	328.00	22.04.94. - 25.04.94.
10	31	К-11Б	37	2.5	80954.90	79323.26	278.82	328.00	18.10.98. - 18.10.98.
11	31	К-20Б	44	3.2	80986.54	79301.63	279.57	332.00	04.03.99. - 05.03.99.
12	31.3	К-06Б	50	3	81012.70	79299.76	280.86	146.00	16.10.98. - 16.10.98.
13	31.3	К-07Б	64	2.45	81020.14	79315.59	281.08	326.00	17.10.98. - 17.10.98.
14	31.3	К-19В	31	3.2	80998.78	79318.60	280.91	330.00	02.03.99. - 02.03.99.
15	31.6	К-02Б	27	3	80989.58	79373.07	281.43	47.00	12.10.98. - 12.10.98.
16	31.6	К-03Б	20	3	81006.24	79385.45	281.96	330.00	13.10.98. - 13.10.98.
17	31.6	К-06	94	2.5	81151.63	79147.44	278.46	329.00	25.04.94. - 29.04.94.
18	31.6	К-06А	41	2.5	81090.09	79235.80	280.40	315.00	25.04.99. - 29.04.94.

Рис. 2. База данных скважин, канав, созданная при помощи программного продукта Micromine

Таблица 2

Структура базы данных

Заголовки выработок	Информация о координатах начала и дополнительная информация по выработке. Название выработки (Номер выработки), разведочная линия, тип выработки, координаты начала выработки (X – восток, Y – север, Z – высотная отметка), длина выработки (принятая, по бурению, по каротажу), длина по журналу документации, год проходки выработки, участок, комментарии
Инклинометрия	Информация о пространственном положении оси выработок в пространстве. Скважины – глубина замера, азимут истинный, вертикальный угол; канавы – координаты точек начала, конца и перегибов выработки
Опробование	Информация с результатами геологического опробования керна, борозды. Название выработки, номер пробы, от, до, длина интервала опробования, азимут и угол падения встречи выработки с рудным телом, истинная мощность, содержание полезных компонентов, г/т, % (Ag, Cu), тип руды окисленная/первичная, содержание полезных компонентов в м/г (Ag), сорт руды, участок, координаты X,Y, Z
Кора выветривания	Информация о мощности и подошве коры выветривания для определения границы окисленных руд – от, до, длина интервала
Тектоника	Информация о тектонических нарушениях – от, до, длина интервала, комментарий о типе нарушения

Надежность увязки рудных залежей проверялась в трехмерной модели, построенной в программе Micromine.

В соответствии с рекомендациями государственной комиссии по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) при разделении запасов по степени изученности к запасам категории C_1 отнесены блоки, разведанные по сети 40–60 м и заключенные между оценочными выработками. К запасам категории C_2 отнесены блоки, разведанные по сети 40–60 м, их оконтуривание проводилось с ограниченной экстраполяцией на половину расстояния между выработками, но не более чем на 50 м, или на 50 м за выработку с кондиционным сечением.

В табл. 3 представлен список кондиционных интервалов, не включенных в подсчет запасов для открытого способа отработки, с объяснением причин их выбраковки.

Подавляющее большинство исключенных из подсчета запасов рудных сечений представляют собой подсечения рудных тел, вскрытых одним сечением, не прослеживаемых и по более мягким кондициям.

Как видно из табл. 3, большинство интервалов менее минимальной истинной мощности рудного тела – 5,0 м, но удовлетворяющих условию метрограмма, а ввиду граничного положения между 3-й и 4-й группами сложности месторождения – нецелесообразно классифицировать эти тела как запасы. Для условий открытой отработки в процессе эксплуатации возможно уточнение положения мелких рудных тел эксплуатационной разведкой и перевод их в запасы. В табл. 3 приведен список кондиционных интервалов, не включенных в подсчет запасов.

Методика построения каркасной модели рудных зон и тел Березкинского месторождения

Построение каркасной модели рудных зон [16, 17] и тел производилось с использованием контуров. Использовалась следующая методика (пошагово):

– контуры рудных зон и тел увязывались между разрезами (рис. 3);

– каркасная модель вытягивалась на половину расстояния между разведочными линиями, если рудное тело или зона не прослеживались, на соседнем разрезе внешний контур рудного тела или зоны проводился с помощью экстраполяции на расстоянии, соответствующем сети выработок, равном 50,0 м;

– каркасная модель корректировалась в 3D режиме по отдельно пробуренным скважинам;

– для учета структурных особенностей месторождения построенная каркасная модель ограничивалась разрывными нарушениями, контролирующими рудные тела и зоны, и обрезалась границей между четвертичными отложениями и коренными породами, а также корректировалась контуром действующего карьера (текущего положения работ) (рис. 4).

На рис. 5 представлена построенная каркасная модель с учетом разрывных нарушений, контролирующих рудные зоны (участок Березкинский).

Построение каркасной модели разломов

На площади интенсивно проявленной дизъюнктивной тектоники, которая представлена сбросо-сдвигами и сдвигами различных знаков и направлений – от субширотного до субмеридионального, а также крупным надвигом.

Таблица 3

Список кондиционных интервалов, не включенных в подсчет запасов

Скважина	Интервал		Мощность, вид, м	Мощность, ист., м	Среднее содержание Ag, г/т	Причина
	от	до				
1	2	3	4	5	6	7
0005G	23,7	40,0	16,3	6,4	12,20	Единичное пересечение рудного тела
217	122,8	124,2	1,4	0,9	12,60	Единичное пересечение рудного тела
517-2	28,0	30,0	2,0	1,8	11,96	Единичное пересечение рудного тела
517-1	39,0	41,0	2,0	0,8	17,40	Единичное пересечение рудного тела
518-2	32,0	33,0	1,0	0,8	13,35	Единичное пересечение рудного тела
209	215,3	215,7	0,4	0,4	17,00	Единичное пересечение рудного тела
521-2	185,0	187,0	2,0	1,9	21,15	Единичное пересечение рудного тела
804	37,0	39,0	2,0	1,3	22,48	Единичное пересечение рудного тела
11501SE	64,8	112,5	47,7	20,5	20,77	Единичное пересечение рудного тела, остановлено в руде
7202SE	8,5	19,5	11,0	3,6	10,66	Единичное пересечение рудного тела
1165SE	29,0	41,0	12,0	5,8	10,48	Единичное пересечение рудного тела
1165SE	45,0	61,0	16,0	7,9	20,60	Единичное пересечение рудного тела
K63ASE	12,0	14,0	2,0	1,9	22,34	Единичное пересечение рудного тела
11730	6,0	8,0	2,0	1,2	18,90	Единичное пересечение рудного тела
11830	18,0	20,0	2,0	1,3	21,96	Единичное пересечение рудного тела

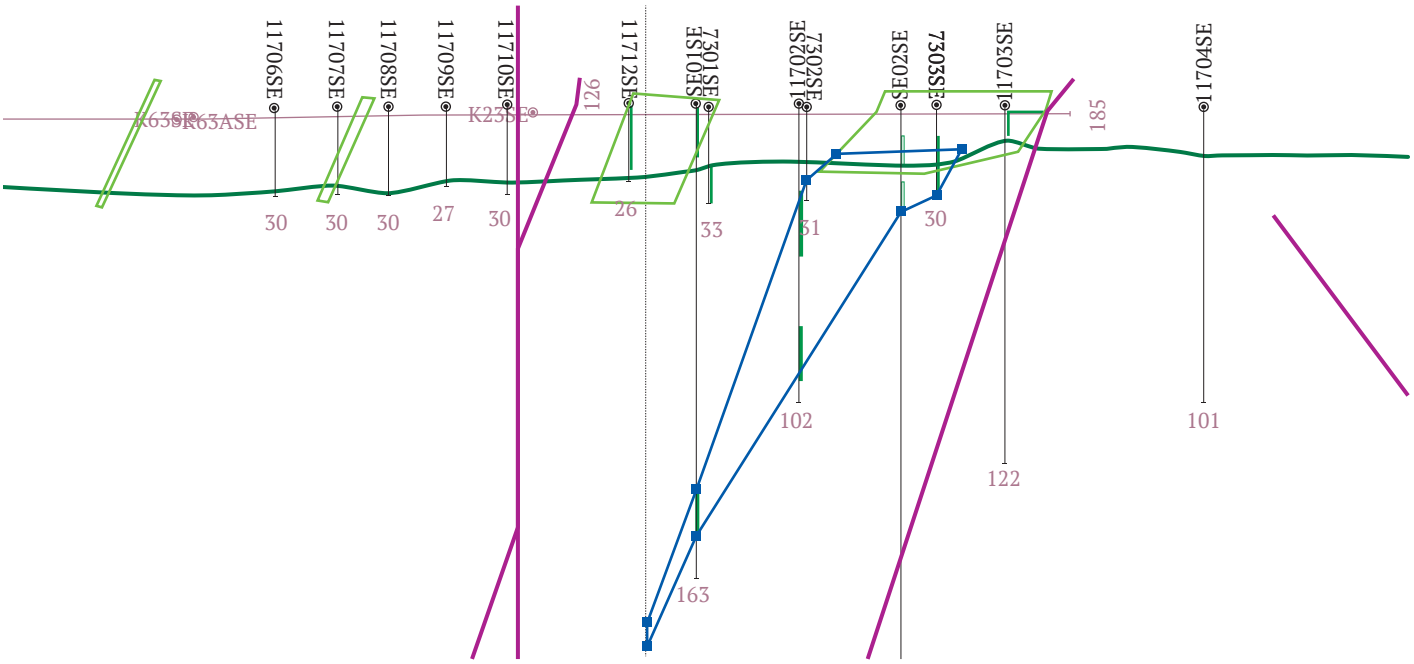


Рис. 3. Векторизация контуров рудных зон на разрезах,
привязанных к композитным интервалам на профиле П-15, участок Березкинский

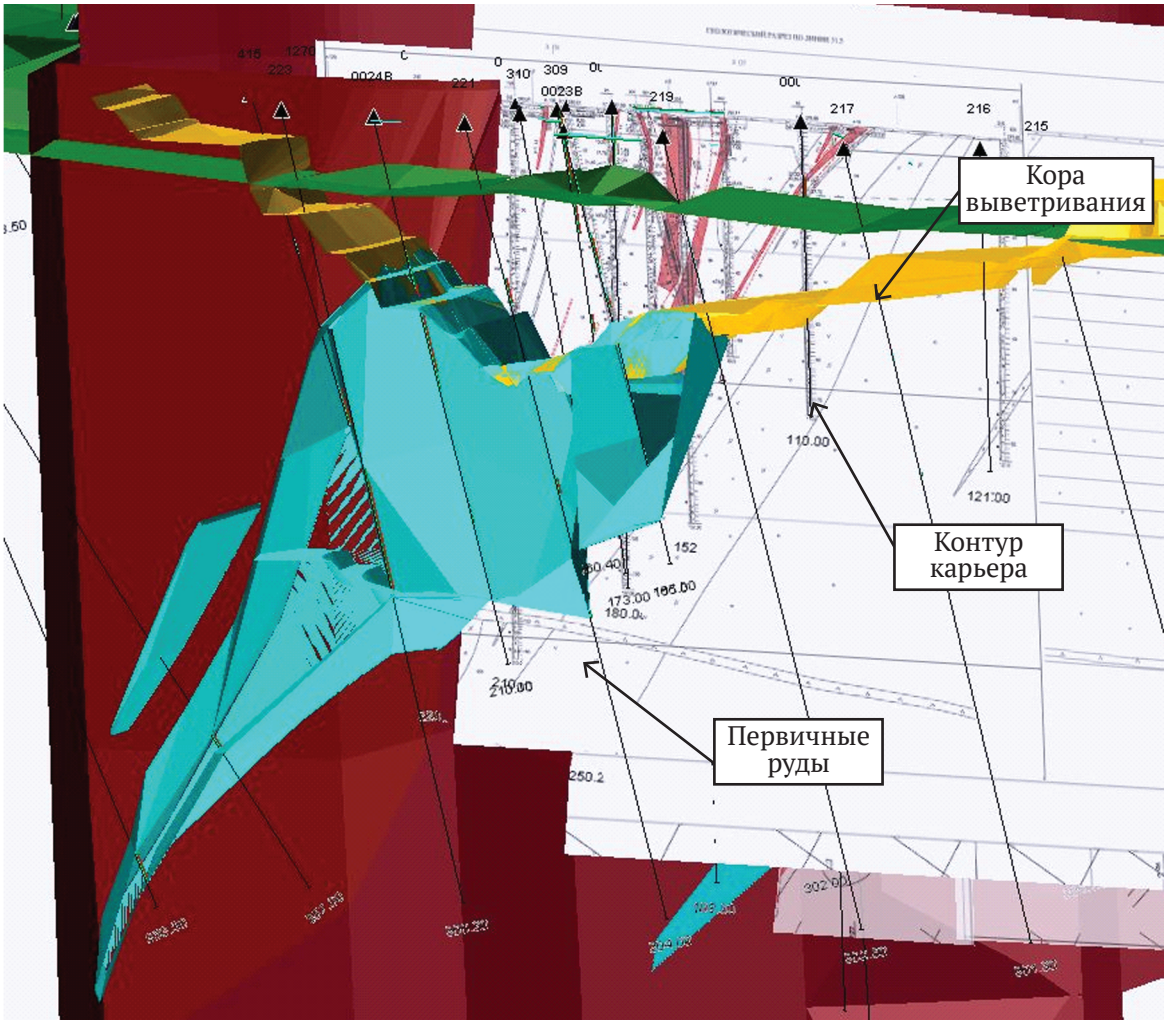


Рис. 4. Увязка контуров между разрезами с учетом коры выветривания и текущего положения работ,
построение каркасной модели (борт 28.3 г/т, первичные) в 3D режиме (профили П15, П57, участок Березкинский)

В основу построения каркасной модели разломов положены планы и разрезы участка Березкинский. Построение каркасной модели разломов проводилось в несколько этапов:

– векторизация контуров тектонических нарушений на разрезах и планах (рис. 6);

– увязка и корректировка между разрезами и планами с учётом геологических данных;

– построение каркасной модели разломов по созданным контурам методом увязки контуров полигонами с учётом геологических данных по скважинам и канавам (рис. 7).

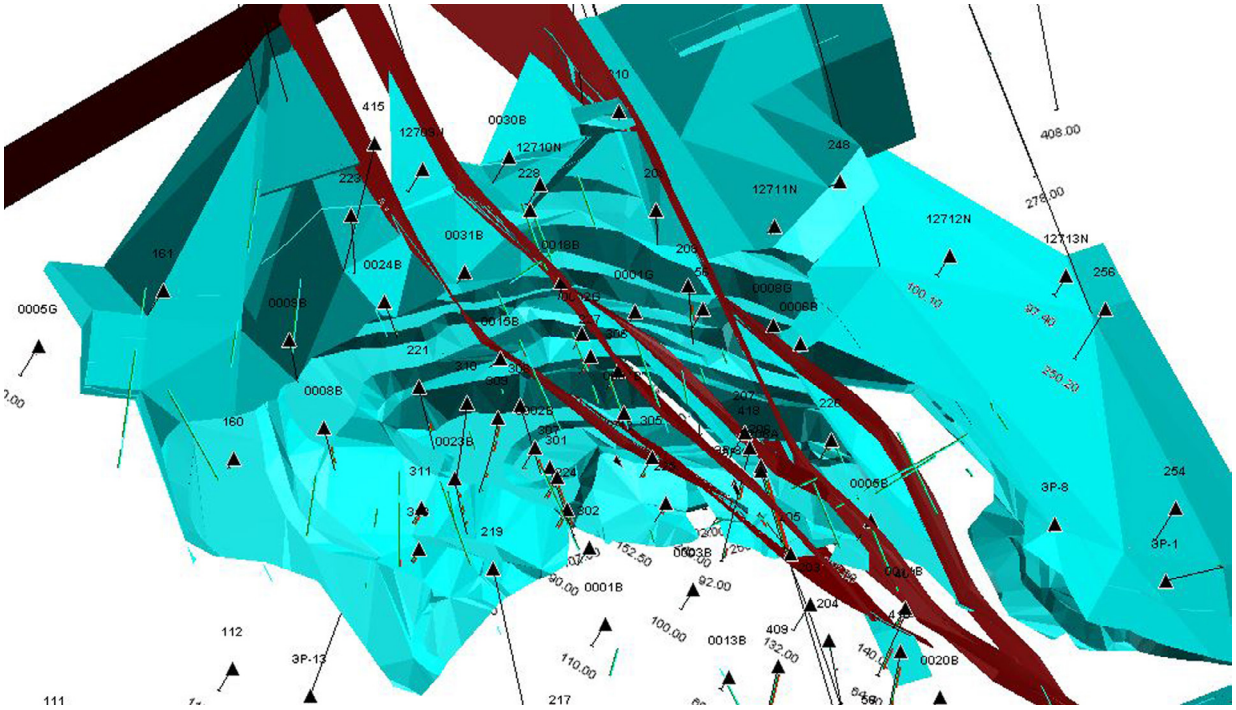


Рис. 5. Построенная каркасная модель с учетом разрывных нарушений, контролирующих рудные зоны, участок Березкинский

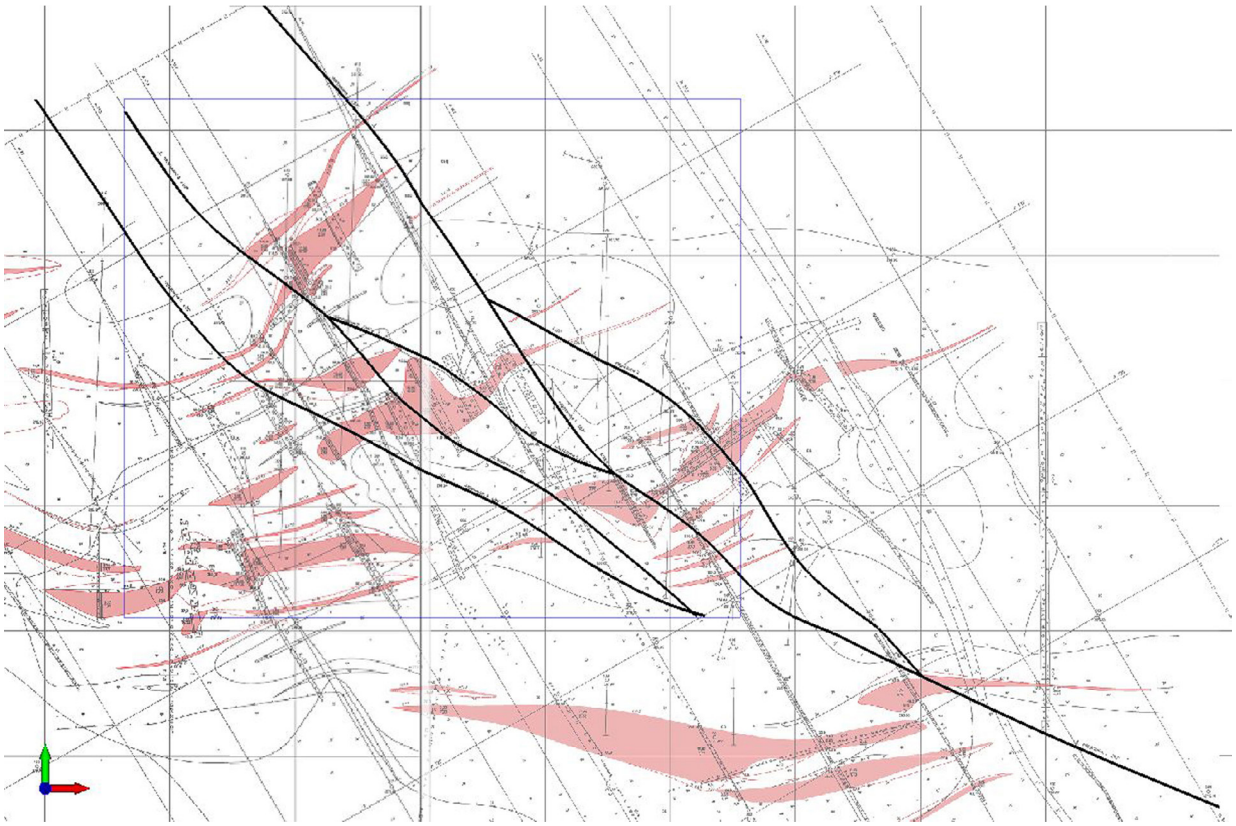


Рис. 6. Векторизация тектонических нарушений в плане, участок Березкинский

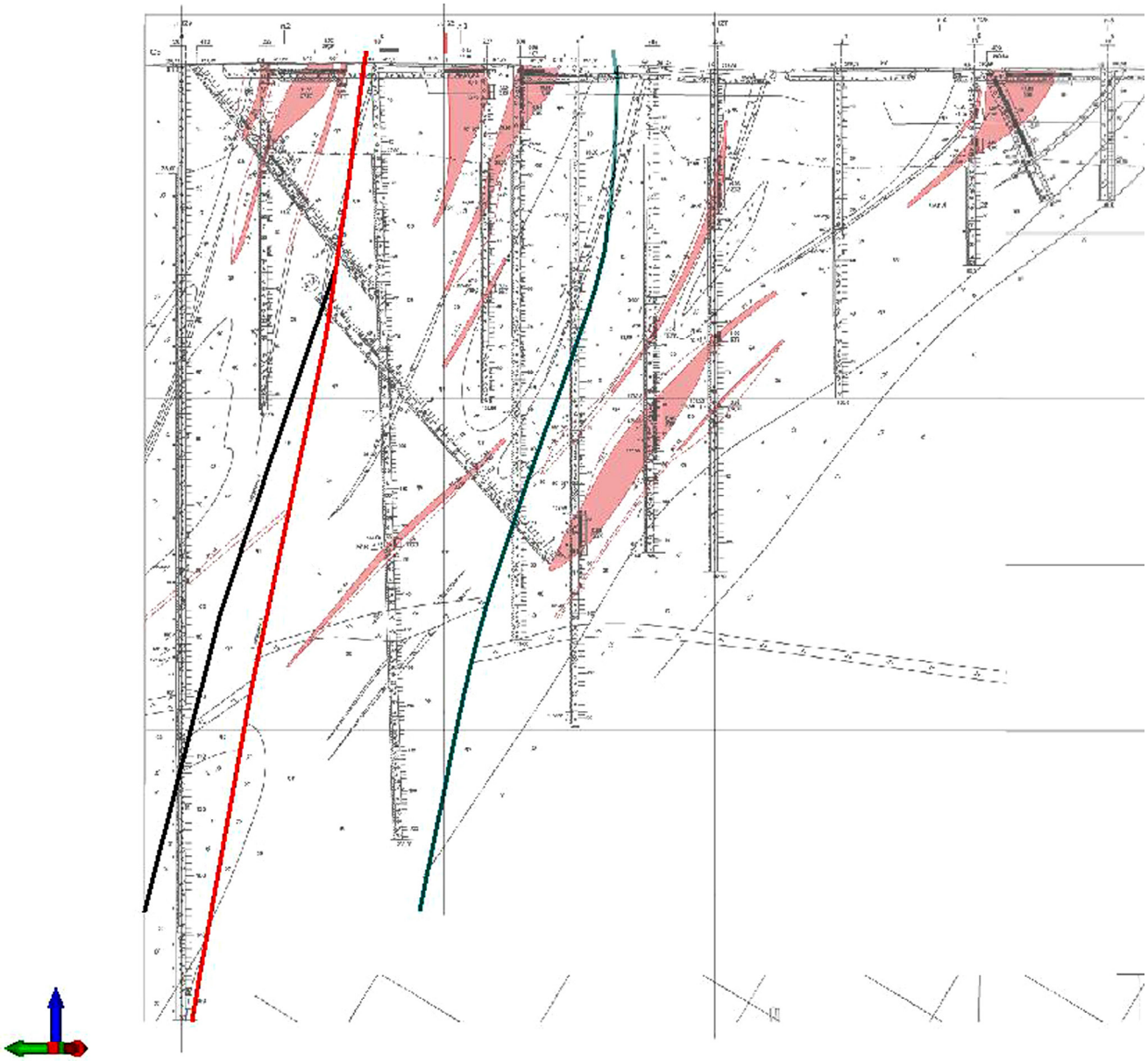


Рис. 7. Векторизация тектонических нарушений в плане, участок Березкинский

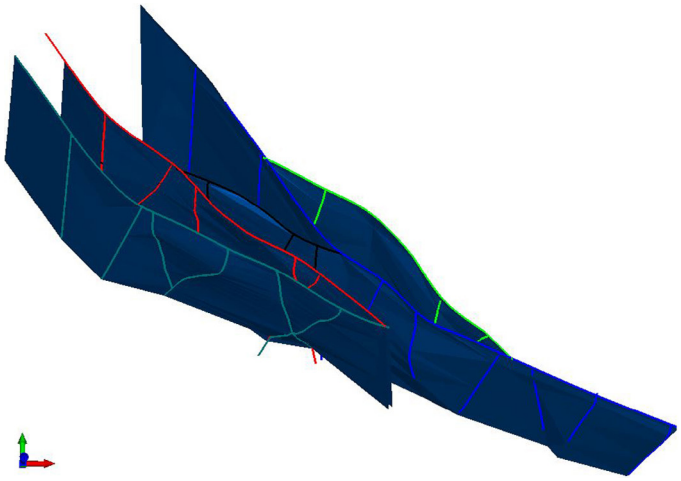
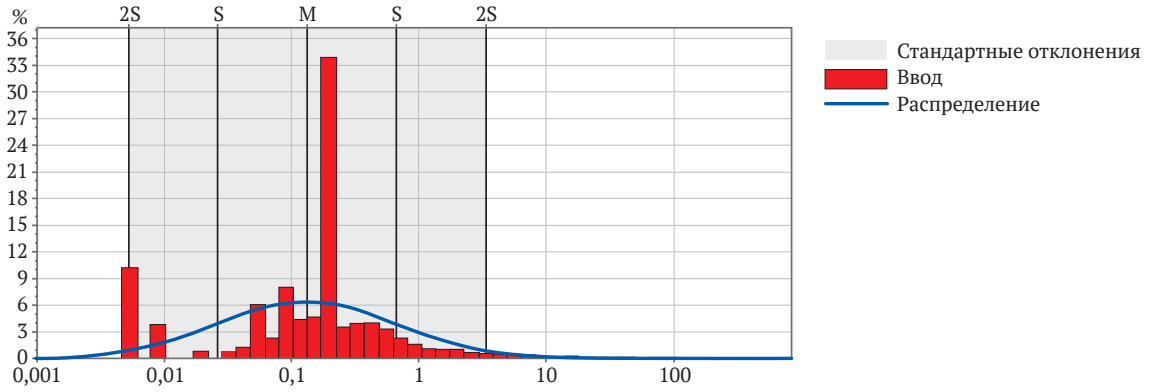


Рис. 8. Увязанная каркасная модель тектонических нарушений план – разрез, участок Березкинский

На рис. 8 показана увязанная каркасная модель тектонических нарушений план – разрез, участок Березкинский.

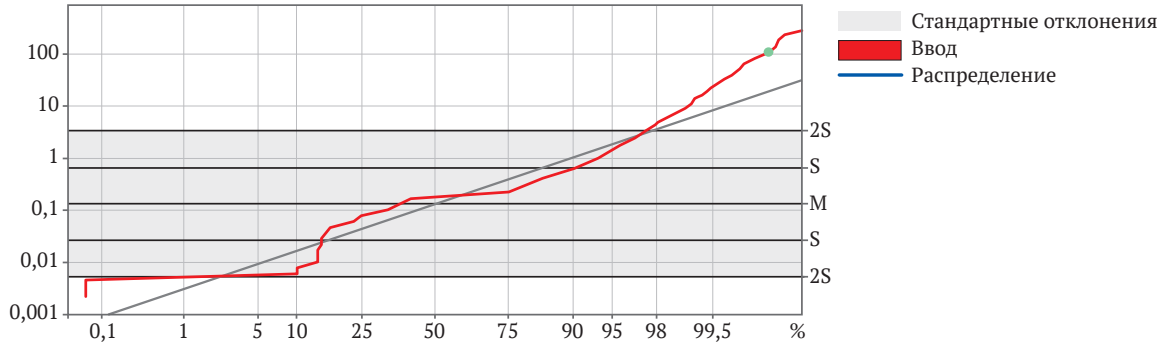
Серебро

По результатам статистического анализа на участке Березкинский выделена одна статистическая популяция (рис. 9, 10). Для определения «ураганных» содержаний использовался график кривой накопленной частности с выделением совокупностей по содержанию, которые определяются по излому линии на графике (точка перегиба), что позволяет выделить участки рудного тела с различной интенсивностью оруденения. Выделены «ураганные» содержания со значением равным 100 г/т серебра для первичных руд и 19,8 г/т серебра – для окисленных. Все пробы с содержанием выше этой величины были понижены до порогового.



Минимальная величина	0.002	Дисперсия	154.849	Геометрическое стд. отклонение	5.011
Максимальная величина	840.000	Стандартное отклонение	12.444	Оценка Сишеля	0.484
2-й по высоте	617.270	Коэффициент вариации	13.460	V Сишеля	2.597
3-й по высоте	535.900	Медиана	0.200	Гамма Сишеля	3.663
4-й по высоте	444.080	Ln среднее	–2.025	Проверка по критерию хи-квадрат	37785.581
Количество	14721	Ln стд. отклонение	1.612	Degrees of Freedom	38
Среднее	0.925	Геометрическое среднее	0.132		

Рис. 9. Логарифмическая гистограмма распределения содержаний серебра в первичных рудах участка Березкинский



Минимальная величина	0.002	Дисперсия	154.849	Геометрическое стд. отклонение	5.011
Максимальная величина	840.000	Стандартное отклонение	12.444	Оценка Сишеля	0.484
2-й по высоте	617.270	Коэффициент вариации	13.460	V Сишеля	2.597
3-й по высоте	535.900	Медиана	0.200	Гамма Сишеля	3.663
4-й по высоте	444.080	Ln среднее	–2.025	Проверка по критерию хи-квадрат	37785.581
Количество	14721	Ln стд. отклонение	1.612	Degrees of Freedom	38
Среднее	0.925	Геометрическое среднее	0.132		

Рис. 10. График накопленной вероятности распределения содержаний серебра в первичных рудах участка Березкинский

Заключение

Применение современных ГИС-технологий позволяет качественно провести оценку перспективности и подсчет запасов на месторождениях [18–20].

На Березкинском месторождении изучены технологические свойства и вещественный состав руд, гидрогеологические и инженерно-геологические особенности месторождений, что позволит провести подсчет запасов по категориям C_1 и C_2 и привлечь их в разработку открытым способом (карьер) Восточного участка Березкинского месторождения.

Список литературы

1. Парилов Ю.С. Оценка недр Казахстана на собственно серебряное оруденение. *Геология и охрана недр*. 2019;(3):4–19.

2. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Мезозойские субщелочные породы центральной части Северного Кавказа: геодинамическая типизация, геохимия и минерагения. *Геология и геофизика юга России*. 2019;9(3):47–62. https://doi.org/10.23671/VNC.2019.3.36479

3. Максаров Р.А., Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г. и др. Новые данные по минералогии золото-сульфидного типа руд месторождения Каральвеем, Чукотка. *Руды и металлы*. 2022;(1):24–43. https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10002

4. Подрезов Д.Р. Методы и модели идентификации запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана. *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2020;(2):32–43. https://doi.org/10.21672/2074-1707.2020.50.2.032-043

5. Абакумов И.В. Опыт переоценки остаточных запасов россыпей валунчатых хромовых руд Сарановского рудного поля. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2020;(2):74–82. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-74-82

6. Cohen M.W., Coelho V.N. Open-pit mining operational planning using multi agent systems. *Procedia Computer Science*. 2021;192:1677–1686. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.172

7. Saleki M., Kakaie R. Ataei M. Mathematical relationship between ultimate pit limits generated by discounted and undiscounted block value maximization in open pit mining. *Journal of Sustainable Mining*. 2019;18(2):94–99. https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.003

8. Федотов Г.С., Пастихин Д.В. Влияние положения трассы вскрывающих выработок на объем горной массы в конечном контуре карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(6):115–123. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-115-123

9. Федотов Г.С., Пастихин Д.В. Методика оптимизации положения вскрывающих выработок при проектировании конечных контуров карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(S8):3–13. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-8-3-13

10. Маниковский П.М., Васютич Л.А., Сидорова Г.П. Методика моделирования рудных месторождений в ГГИС Micromine. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2021;27(2):6–14. https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-2-6-14

11. Третьякова О.Г., Третьяков М.Ф., Софронов Г.В. Моделирование терригенных коллекторов и оценка прогнозных ресурсов россыпной алмазоносности на участке Ханнинский с помощью горно-геологической информационной системы (ГГИС) Micromine. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле*. 2019;4(16):20–30. https://doi.org/10.25587/SVFU.2020.16.49722

12. Mery N., Emery X., Cáceres A., Ribeiro D., Cunha E. Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit. *Ore Geology Reviews*. 2017;88:336–351. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.011

13. Mehrabi B., Fazel E., Yardley B. Ore geology, fluid inclusions and O-S stable isotope characteristics of Shurab Sb-polymetallic vein deposit, eastern Iran. *Geochemistry*. 2019;79(2):307–322. https://doi.org/10.1016/j.geoch.2018.12.004

14. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):104–118. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118

15. Босиков И.И., Клюев Р.В., Гаврина О.А. Анализ геолого-геофизических материалов и качественная оценка перспектив нефтегазоносности Южно-Харбижинского участка (Северный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2021;11(1):6–21. https://doi.org/10.46698/VNC.2021.36.47.001

16. Савельев Д.Е., Макатов Д.К., Портнов В.С., Гатауллин Р.А. Морфология и текстурно-структурные особенности хромититовых залежей главного рудного поля Кемпирсайского массива (Южный Урал, Казахстан). *Георесурсы*. 2022;24(1):62–73. https://doi.org/10.18599/grs.2022.1.6

17. Столяренко В.В., Минаков А.В., Рябошапко А.Г., Минаева С.В., Алфёрова В.А. Прогнозно-поисковая модель золотого оруденения в пределах мезозойских впадин в Центрально-Алданском рудно-россыпном районе (на примере Верхне-Якокутского рудного поля). *Руды и металлы*. 2022;(1):44–76. https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10003

18. Клюев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В., Гаврина О.А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020;12(2):283–290. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290

19. Tyulenev M.A., Markov S.O., Gasanov M.A., Zhironkin S.A. Numerical Modeling in the Structural Study of Technogenic Rock Array. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018;36(5):2789–2797. https://doi.org/10.1007/s10706-018-0501-3

20. Hazra T., Samanta B., Dey K. Real option valuation of an Indian iron ore deposit through system dynamics model. *Resources Policy*. 2019;60:288–299. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.01.002

References

1. Parilov Yu.S. Assessment of Kazakhstan's subsurface for own silver mineralization. *Geology and Bowels of the Earth*. 2019;(3):4–19. (In Russ.)

2. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. Mesozoic subalkaline rocks of Central part of the Northern Caucasus: geodynamical typification, geochemistry and minerageny. *Geology of the South of Russia*. 2019;9(3):47–62. (In Russ.) https://doi.org/10.23671/VNC. 2019.3.36479

3. Maksarov R.A., Prokopiev I.R., Doroshkevich A.G., Redin Yu.O., Malyutina A.V. New data on the mineralogy of the gold-sulfide ore type of the Karalveem deposit, Chukotka. *Ores and Metals*. 2022;(1):24–43. (In Russ.). https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10002

4. Podrezov D.R. Methods and models of identification of reserves of technological units of uranium well leaching mine. *Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2020;(2):32–43. (In Russ.). https://doi.org/10.21672/2074-1707.2020.50.2.032-043

5. Abakumov I.V. Revaluation of alluvial deposits residual reserves of boulder chrome ores of the Saranovsky ore field. *News of the Ural State Mining University*. 2020;(2):74–82. (In Russ.). https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-74-82

6. Cohen M.W., Coelho V.N. Open-pit mining operational planning using multi agent systems. *Procedia Computer Science*. 2021;192:1677–1686. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.172

7. Saleki M., Kakaie R. Ataei M. Mathematical relationship between ultimate pit limits generated by discounted and undiscounted block value maximization in open pit mining. *Journal of Sustainable Mining*. 2019;18(2):94–99. https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.003

8. Fedotov G.S., Pastikhin D.V. Influence of access road pattern on mine rock volume within the ultimate pit limit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(6):115–123. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-115-123

9. Fedotov G.S., Pastikhin D.V. Methods of opening position optimization in ultimate pit design. *Journal of Sustainable Mining*. 2020;(S8):3–13. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-8-3-13

10. Manikovsky P.M., Vasyutich L.A., Sidorova G.P. Micromine methodology for modeling ore deposits in the GIS Micromine. *Transbaikal State University Journal*. 2021;27(2):6–14. (In Russ.). https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-2-6-14

11. Tretiakova O.G., Tretiakov M.F., Sofronov G.V. Modeling of terrigenous collectors and assessment of forecast resources of placer diamond potential on Khanninsky site with the mining-and-geological information system (GGIS) Micromine. *Vestnik of North-Eastern Federal University: Earth Sciences*. 2019;4(16):20–30. (In Russ.). https://doi.org/10.25587/SVFU.2020.16.49722

12. Mery N., Emery X., Cáceres A., Ribeiro D., Cunha E. Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit. *Ore Geology Reviews*. 2017;88:336–351. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.011

13. Mehrabi B., Fazel E., Yardley B. Ore geology, fluid inclusions and O-S stable isotope characteristics of Shurab Sb-polymetallic vein deposit, eastern Iran. *Geochemistry*. 2019;79(2):307–322. https://doi.org/10.1016/j.geoch.2018.12.004

14. Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):104–118. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118

15. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Gavrina O.A. Analysis of geological-geophysical materialsand qualitative assessment of the oil and gas perspectives of the Yuzhno-Kharbizhinsky area (Northern Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii*. 2021;11(1):6–21. (In Russ.). https://doi.org/10.46698/VNC.2021.36.47.001

16. Saveliev D.E., Makatov D.K., Portnov V.S., Gataullin R.A. Morphological, textural and structural features of chromitite deposits of main ore field of Kempirsay massif (South Urals, Kazakhstan). *Georesursy*. 2022;24(1):62–73. (In Russ.). https://doi.org/10.18599/grs.2022.1.6

17. Stolyarenko V.V., Minakov A.V., Ryaboshapko A.G., Minaeva S.V., Alferova V.A. Mineral potential modelling for gold mineralization withinthe mesozoic depressions in the Central Aldan ore-placer region (on the example of the Upper Yakokut ore field). *Ores and Metals*. 2022;(1):44–76. (In Russ.). https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10003

18. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;12(2):283–290. (In Russ.). https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290

19. Tyulenev M.A., Markov S.O., Gasanov M.A., Zhironkin S.A. Numerical Modeling in the Structural Study of Technogenic Rock Array. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018;36(5):2789–2797. https://doi.org/10.1007/s10706-018-0501-3

20. Hazra T., Samanta B., Dey K. Real option valuation of an Indian iron ore deposit through system dynamics model. *Resources Policy*. 2019;60:288–299. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.01.002

Информация об авторах

Игорь Иванович Босиков – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело», Северо-Кавказский горно-металлургический институт, г. Владикавказ, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-8930-4112, Scopus ID 56919738300; e-mail igor.boss.777@mail.ru

Роман Владимирович Клюев – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника низких температур им. П. Л. Капицы», Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0003-3777-7203, ScopusID 57194206632; e-mail kluev-roman@rambler.ru

Information about the authors

Igor I. Bosikov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of the Oil and Gas Department, North Caucasian Mining and Metallurgical Institute, Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID 0000-0001-8930-4112, Scopus ID 56919738300; e-mail igor.boss.777@mail.ru

Roman V. Klyuev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of the Technique of Low Temperature name P. L. Kapitza, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0003-3777-7203, Scopus ID 57194206632; e-mail kluev-roman@rambler.ru

Поступила в редакцию	27.06.2022	**Received**	27.06.2022
Поступила после рецензирования	19.07.2022	**Revised**	19.07.2022
Принята к публикации	25.08.2022	**Accepted**	25.08.2022