

УДК 004.02:622.22

doi:10.21685/2072-3059-2021-1-5

Геостатистический анализ ресурсной базы месторождения на основе создания трехмерных каркасных моделей минерализованных зон

С. Н. Гончаренко

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

gs16@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность работы обусловлена необходимостью уточнения соответствующих бортовых содержаний в минеральных ресурсах как для приповерхностной, так и глубинной минерализации месторождения. Данная предпосылка связана с тем, что основной риск в отношении перспектив освоения минеральных ресурсов месторождения связан с качеством результатов анализов, используемых в подсчете запасов. В этой связи целью работы являлось проведение ряда заверочных расчетов по процентному содержанию рудных блоков с применением трехмерного инженерно-геологического моделирования с использованием геостатистических показателей, что позволило выявить наличие более сложного характера распределения содержаний рудного тела. *Материалы и методы.* В работе проведена экспертная оценка текущей геологической интерпретации минеральных ресурсов месторождения, а также разработан порядок выполнения работ, проводимых для их подсчета. *Результаты.* Осуществлена подготовка геологической модели исходя из результатов интерпретации разрезов скважин и планов уступов, а также проведена оцифровка данных в виде трехмерных каркасов для выбора проб и оценки объемов. Реализованы процедуры статистического и геостатистического анализа, которые позволили выработать подходы к композитированию и обработке содержаний полезного компонента. *Выводы.* Разработанная блочная модель месторождения позволила осуществить классификацию ресурсов, а также произвести оценку адекватности ресурсной модели методами статистической и визуальной проверки оцененных содержаний.

Ключевые слова: моделирование ресурсов месторождения, геостатистический анализ, блочная модель месторождения, интерпретация оруденения, зоны минерализации, алгоритмы Кригинга

Для цитирования: Гончаренко С. Н. Геостатистический анализ ресурсной базы месторождения на основе создания трехмерных каркасных моделей минерализованных зон // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 1. С. 46–62. doi:10.21685/2072-3059-2021-1-5

Geostatistical analysis of the resource base of the deposit based on wireframe models' 3D creation of mineralized zones

S.N. Goncharenko

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

gs16@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the research is due to the need to clarify the corresponding cut-off grades in mineral resources, both for near-surface and deep mineralization

© Гончаренко С. Н., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

of the deposit. This premise is related to the fact that the main risk in relation to the prospects for the development of the mineral resources of the deposit is associated with the quality of the analysis results used in the calculation of reserves. In this regard, the purpose of the work was to carry out a number of verification calculations for the percentage of ore blocks using 3D engineering and geological modeling using geostatistical indicators, which made it possible to find out the presence of a more complex distribution of the ore body grades. *Materials and methods.* The work includes an expert assessment of the modern geological interpretation of the mineral resources of the deposit, as well as a procedure for performing the work carried out to calculate them. *Results.* A geological model was prepared based on the results of interpretation of well sections and bench plans, and data was digitized in the form of 3D wireframes for sampling and volume estimation. The procedures for statistical and geostatistical analysis have been implemented, which have made it possible to develop approaches to compositing and processing the contents of a useful component. *Conclusions.* The developed block model of the field made it possible to classify resources, as well as to assess the adequacy of the resource model by methods of statistical and visual verification of the estimated contents.

Keywords: deposit resource modeling, geostatistical analysis, block model of the deposit, mineralization interpretation, mineralization zones, Kriging's algorithms

For citation: Goncharenko S.N. Geostatistical analysis of the resource base of the deposit based on wireframe models' 3D creation of mineralized zones. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;1:46–62. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-1-5

Введение

Интерпретация оруденения является одним из наиболее важных этапов в процессе моделирования ресурсов, поскольку контуры, полученные на основе интерпретации, определяют как объемы/тоннаж горнорудной массы, так и установленные содержания [1, 2]. Интерпретация минерализованных тел, содержащих полезные компоненты, проводилась по различным бортовым содержаниям для бедных и для богатых рудных интервалов. Месторождение интерпретировалось в интерактивном режиме с помощью 80 разрезов и композитов содержаний, которые использовались для содействия интерпретации. Разрезы отстраивались вкрест простирания интерпретированных геологических структур и минерализованных тел. Композиты содержаний создавались с помощью следующих параметров: бортовое содержание металла, %; минимальная длина композита, м; минимальное содержание полученного композита, %; максимальная общая длина пустой породы, м; максимальная сплошная длина интервала пустой породы, м; максимальное расстояние между пробами, м; минимальное содержание в структуре длин для коротких интервалов, %·м. Каждый разрез визуализировался наряду с траекториями скважин, закодированными с помощью цветовой кодировки в соответствии с содержаниями проб и значений содержаний в пробе. Все траектории скважин также были закодированы с помощью цветовой кодировки в виде штриховки для композитов содержаний, с одной стороны, и в виде литологических интервалов – с другой. Кроме того, проводилась трехмерная интерпретация, т.е. точки стрингов привязывались к соответствующим буровым интервалам [3–6].

В работе не ставилась цель проведения интерпретации всех выявленных литологических интервалов, вместо этого был построен набор стрингов для основных литологических интервалов, таких как метасоматически изме-

ненные породы (скарны и грейзены), граниты, основание зоны окисления и покровных отложений. Открытые стринги оцифровывались для покровных отложений и границ зоны окисления, а закрытые стринги – для гранитов и скарнов. Эти литологические характеристики и зоны контролируют морфологию и степень минерализации, в связи с чем они использовались в процессе интерпретации минерализованных зон [7, 8].

Материалы и методы

При интерпретации минерализации использовалась следующая совокупность условий и действий: каждый разрез выводился на экран с ограниченным окном, равным половине расстояния от смежных разрезов; все интерпретированные стринги привязывались к соответствующим буровым интервалам, т.е. интерпретация ограничивалась трехмерной средой; прослой пустой породы в пределах минерализованных тел не интерпретировались и не моделировались, данные прослой включались в интерпретированные зоны при условии, что внутренние прослой пустой породы являлись частью композитов содержаний; интерпретация распространялась перпендикулярно соответствующему первому и последнему интерпретированному разрезу на расстояние, равное половине расстояния между смежными разведочными профилями; если каркас минерализованного тела не распространялся до смежного бурового разреза, в этом случае он проецировался на половину расстояния к следующему разрезу и обрывался, при этом выдерживалось основное направление и падение зон; если минерализованная линза находилась на топографической поверхности либо на поверхности покровных отложений, то она протягивалась выше поверхности для исключения пробелов между линзой и топоповерхностью при построении блочной модели [9, 10]. Примеры интерпретированного разреза и каркасов минерализованных рудных тел показаны на рис. 1, 2.

Интерпретированные стринги использовались для создания трехмерных сплошных каркасных моделей по минерализованным зонам и литологическим интервалам. Каждый разрез выводился на экран вместе с ближайшим интерпретированным разрезом. Если соответствующий каркас не возникал на следующем разрезе, то последний проецировался на половину расстояния к следующему разрезу и там обрывался. Типичный трехмерный вид завершеного каркаса показан на рис. 3.

Отбор проб для геостатистического анализа и интерполяции проводился следующим образом [11, 12]. Выборка данных по скважинам является стандартной процедурой для обеспечения использования корректных проб в традиционном статистическом и геостатистическом анализе, а также для интерполяции содержаний. Для выборки и кодировки проб скважин, как правило, используются сплошные каркасные модели или модели цифровой поверхности. Все пробы были отобраны и закодированы посредством закрытых каркасных моделей минерализованных тел в автоматическом режиме. В файле данных опробования было создано дополнительное поле, в котором процесс кодировки зафиксировал соответствующие коды и наименования минерализованных тел. Отмеченные пробы заверялись визуально для подтверждения корректности выборки проб каркасными моделями. Традиционный статистический анализ затем проводился повторно по содержаниям полезно-

го компонента в пределах минерализованных тел [13]. Композитирование буровых интервалов является стандартной процедурой, применяемой для приведения всех интервалов опробования к одной длине (volume support) с тем, чтобы все пробы имели одинаковый вес во время интерполяции содержаний и геостатистического анализа. Как правило, длина композитного интервала устанавливается близкой к стандартной или средней длине опробования.

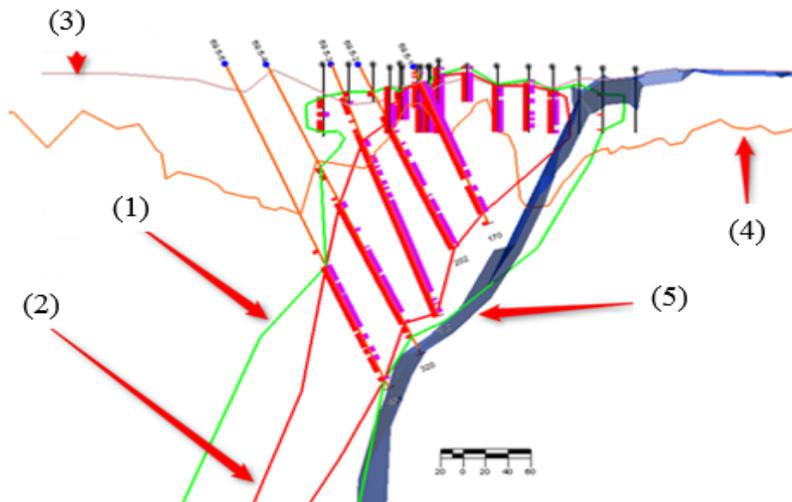


Рис. 1. Пример интерпретированных стрингов: 1 (светло-зеленая линия) – интерпретированная зона минерализации по бортовому содержанию металла X1, %; 2 (красная линия) – интерпретированная зона минерализации по бортовому содержанию металла X2, %; 3 (фиолетовая линия) – интерпретированные покровные отложения; 4 (коричневая линия) – интерпретированная зона окисления; 5 (синяя линия) – интерпретированная гранитная интрузия; толстые линии вдоль траектории скважин (штриховка) – композиты содержаний (красным цветом – композиты X1, %; фиолетовым цветом – композиты X2, %)

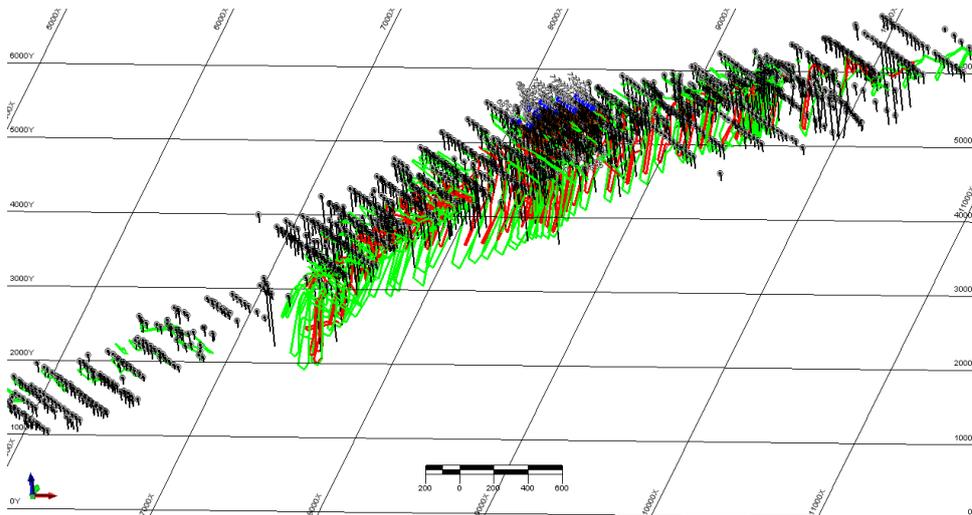


Рис. 2. Интерпретированные каркасы минерализованных рудных тел

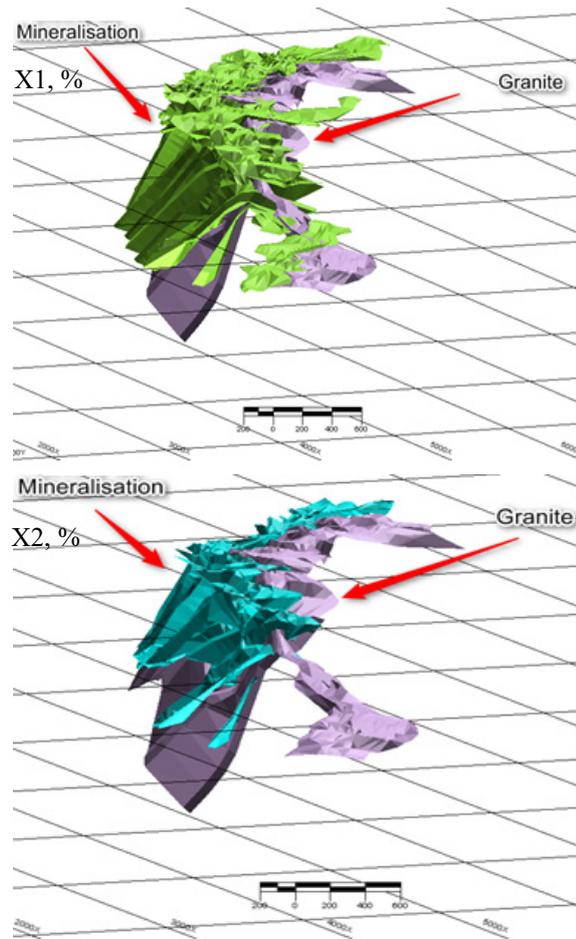


Рис. 3. Каркасные модели минерализованных тел с бортовым содержанием полезного компонента X1, X2, %

Минерализованные тела рассматриваемого месторождения изучались в основном буровым методом. Опробование бурового керна проводилось одномоетровыми секциями. Средняя длина интервала опробования по всем пробам, выбранным в пределах отстроенных каркасных моделей минерализованных тел, оказалась близкой к 1 м. Исходя из этого были установлены композитные интервалы длиной 1 м для всех проб в пределах минерализованных тел (рис. 4).

Процесс композитирования прекращался и возобновлялся на всех границах между минерализованными телами и пустыми породами, а также между разными зонами. При возникновении пробела менее 10 см между пробами он включался в состав композитной пробы. Если пробел оказывался длиннее 10 см, композит прерывался, а другой композит начинался со следующей пробы.

Целью проведенного геостатистического анализа является создание серии полувариограмм, которые могут применяться в качестве взвешивающего механизма для исходных данных для алгоритмов Кригинга. Диапазоны полувариограмм, определенных в результате такого анализа, играют очень важную роль для определения поисковых соседствующих геометрических параметров.

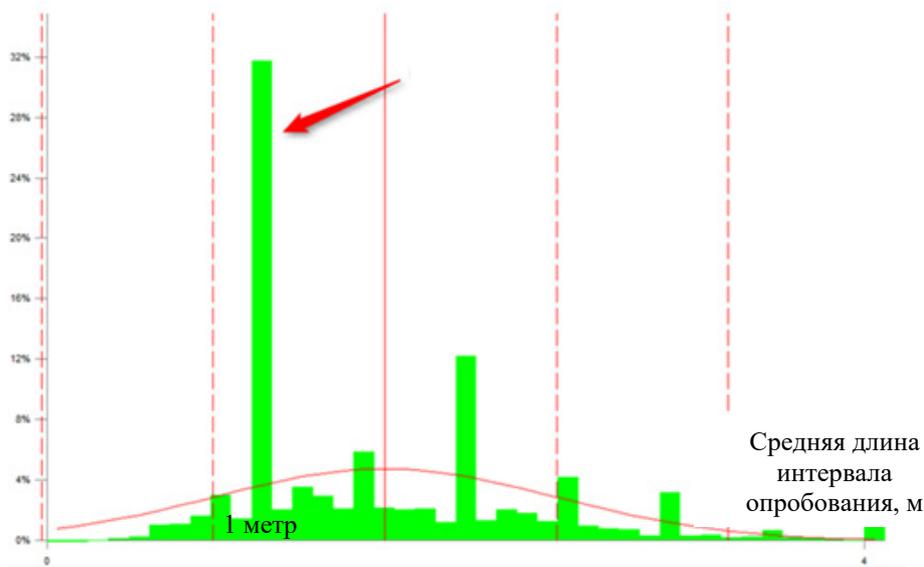


Рис. 4. Гистограмма частот по длине проб бурового керна

Таким образом, геостатистический анализ проводился для решения следующих основных задач:

1. Оценить присутствие направленной анизотропии оруденения. Данную оценку можно провести путем изучения направленных полувариограмм. Направленная анизотропия присутствует в случае, если полувариограммы достигают итогового плато значений при различных расстояниях в различных направлениях.

2. Оценить пространственную выдержанность содержаний полезного компонента по основным направлениям анизотропии. Непрерывность содержаний полезного компонента может быть оценена путем использования зон влияния полувариограмм, т.е. расстояний, на котором полувариограммы достигают полного порога (плато). Соответственно содержания нельзя достоверно оценить, если поисковый радиус для интерполяции содержаний превышает диапазон полувариограммы. При достижении полувариограммой итогового плато при таком расстоянии между парами проб корреляция между ними отсутствует.

3. Получить параметры полувариограммы (эффект «самородка», итоговое плато и диапазоны) для последующего использования в качестве исходных данных в процессе интерполяции.

Все вариограммы были рассчитаны и смоделированы для файла композитной пробы в контурах соответствующих минерализованных зон. Геостатистический анализ для минерализации полезных компонентов проводился отдельно. Все попытки провести геостатистический анализ отдельно для зоны окисления и зоны первичной минерализации не привели к убедительным результатам, в этой связи было решено провести анализ по всем пробам в пределах минерализованных тел.

Были произведены все горизонтальные полувариограммы для определения направления максимального сплошного распределения содержаний полезного компонента. Полувариограммы не выявили конкретных направлений рас-

пределения, однако полувариограммы для диапазона от 36° до 72° оказались относительно устойчивыми. На рис. 5 показан вариант построения рудного тела для угла в 48° , который соответствует максимальному сплошному распределению содержаний полезного компонента, а также коррелирует с общим простираем минерализации.

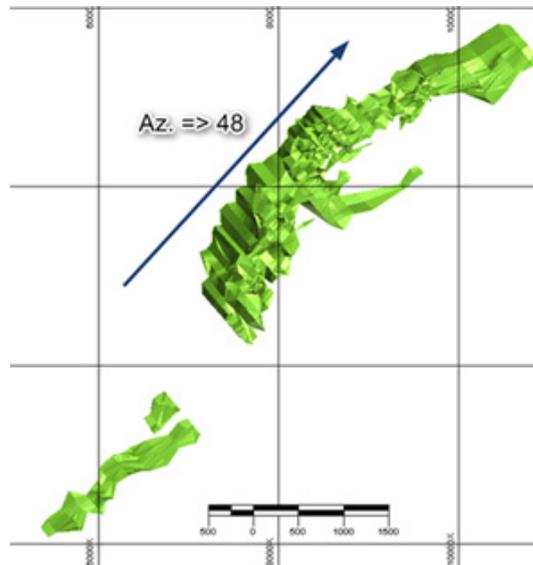


Рис. 5. Направление максимальной выдержанности распределения содержания полезного компонента в рудном теле

Вертикальный веер полувариограмм в этом направлении не выявил угла погружения по главной оси. Угол погружения по второй оси, равный 0, был определен аналогичным образом. Третье направление было задано перпендикулярно первой основной оси (рис. 6). Все три оси пространственной анизотропии моделировались на следующем этапе. Было установлено, что получение устойчивых вариограмм для минерализации невозможно. Это было ожидаемо, поскольку коэффициент изменчивости оказался относительно высоким. Несмотря на это, удалось сформировать устойчивые медианные (содержание полезного компонента в пределах зон минерализации) индикаторные полувариограммы. Все полученные диапазоны полувариограмм были использованы для определения поискового радиуса. Последний использовался в процессе интерполяции содержаний полезного компонента на месторождении. Проведенные исследования позволили произвести зонирование месторождения. При этом месторождение было разбито на следующие зоны по бортовому содержанию полезного компонента: богатая зона (бортное содержание X_1 , %), бедная зона (бортное содержание X_2 , %) и зоны окисленных интервалов (зона окисления (выше границы окисления), невыветрелая/сульфидная зона (ниже границы окисления)).

На следующем этапе исследований было проведено блочное моделирование месторождения, состоящее из нескольких этапов. В первую очередь была создана базовая блочная модель в пределах замкнутых каркасных моделей для минерализованных зон, интерпретированных и смоделированных по бортовому содержанию полезного компонента X_1 , %.

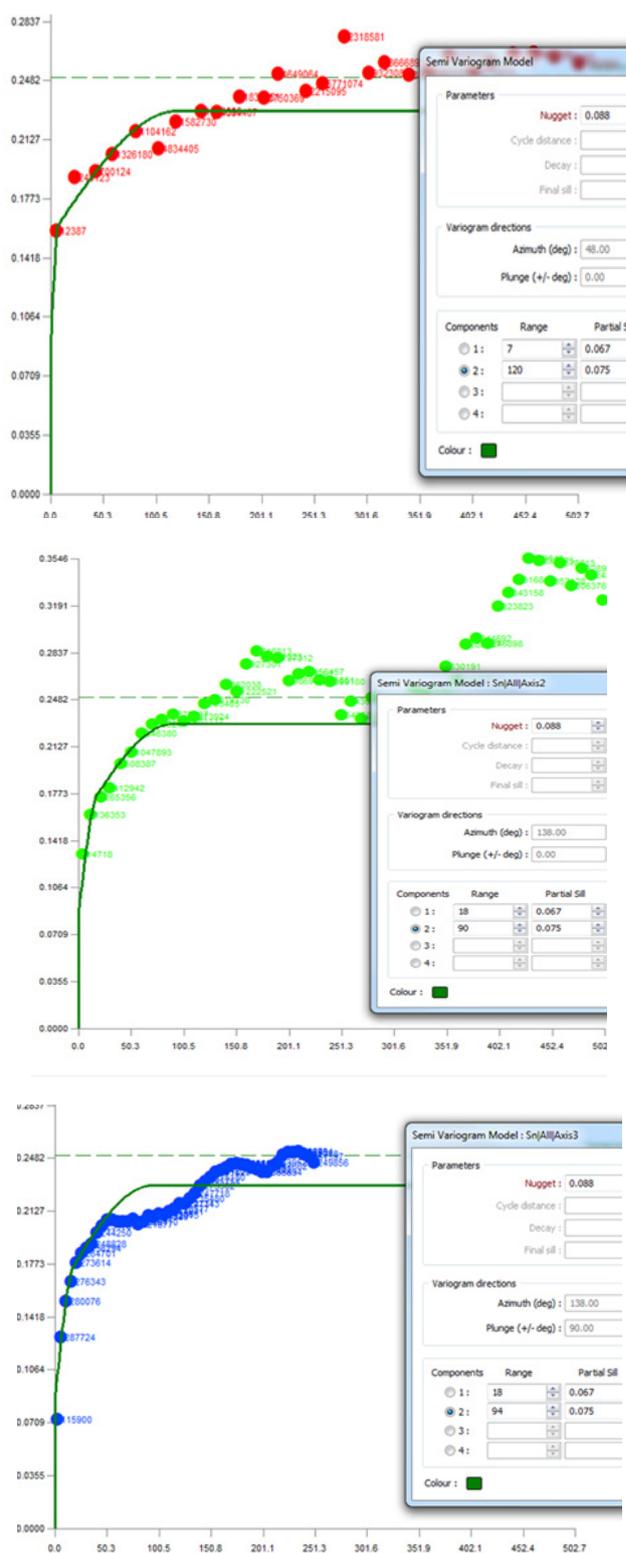


Рис. 6. Моделирование полувариограмм для различных направлений минерализации полезного компонента

Все блоки, оказавшиеся в пределах границ богатой зоны, были закодированы в виде блоков с содержанием X_1 , %, а остальные блоки – по бортовому содержанию X_2 , %. После этого в блочную модель были введены ограничения по поверхности покровных отложений (модель цифровой поверхности), т.е. все ячейки модели выше поверхности были удалены из модельного файла, затем закодированы поверхностью окисления.

После первоначального заполнения с помощью соответствующего размера материнской ячейки при необходимости следовало субблокирование. Субблокирование происходило возле границ минерализованных тел или в местах пересечения моделей с цифровыми моделями топоповерхности и/или покровных отложений. Размер материнской ячейки устанавливался исходя из общей морфологии минерализованных тел, а также с целью исключения возможности получения чрезмерно большой блочной модели. Размер субблоков устанавливался исходя из необходимости соответствовать требуемому разрешению минерализованных тел. При наличии возможности субблоки впоследствии оптимизировались в модели для формирования более крупных ячеек. Кодировка модели для минерализованного тела основывалась на отдельной каркасной модели месторождения.

На следующем этапе исследования было проведено определение значений объемного веса (насыпной плотности) минеральных ресурсов месторождения. Проводились определения физико-механических свойств скальных пород и дисперсных грунтов. Результаты этих работ позволили получить дополнительные данные по объемному весу (ОВ) горных пород месторождения. Для расчета ОВ использовались только результаты, полученные методом прямого взвешивания и определения, чтобы учесть уровень пористости горных пород и минералов. По каждому литологическому типу показатели ОВ анализировались отдельно. В целях подсчета минеральных ресурсов в рамках данного анализа вскрышные породы не рассматривались. При расчете ОВ по корам выветривания были приняты во внимание следующие факторы: коры выветривания состоят из глинистой и глинисто-щебнистой коры выветривания, а показатели ОВ глинисто-щебнистой коры выветривания схожи с показателями ОВ первичных пород; показатели ОВ коры выветривания в минерализованных и неминерализованных участках месторождения могут отличаться в силу различного минералогического состава.

Статистика распределения основана на 10 определениях ОВ глинистой коры выветривания, среднее значение плотности по которым составило $1,59 \text{ г/см}^3$, минимальный показатель – $1,31 \text{ г/см}^3$, максимальный – $1,95 \text{ г/см}^3$. В силу ограниченного количества проб, объективное определение показателя ОВ для глинистой коры выветривания в безрудной части месторождения является затруднительным. Однако для целей и задач подсчета минеральных ресурсов данный факт не является критически важным.

Определения ОВ ограничивались минерализованными зонами. Результаты этих исследований были использованы при определении ОВ коры выветривания зоны минерализации. Основная часть определений пришлось на глинистую кору выветривания (40 проб), лишь три пробы были отобраны из глинисто-щебнистой коры выветривания. В силу различий между глинистой и глинисто-щебнистой корой выветривания их изучение проводилось по отдельности. Распределение объемного веса глинистой коры выветривания показало, что минимальное и максимальное значения составляют 1,42 и

2,07 г/см³ соответственно. В основном значения группируются в диапазоне 1,7–1,98 г/см³ с выделяющимися значениями в диапазоне 1,56–2 г/см³ и в пределах 2,07–3 г/см³. Наиболее распространенные значения плотности – 1,85 и 1,86 г/см³. С помощью полученных законов распределений был рассчитан ОБ коры выветривания минерализованной зоны (рис. 7).

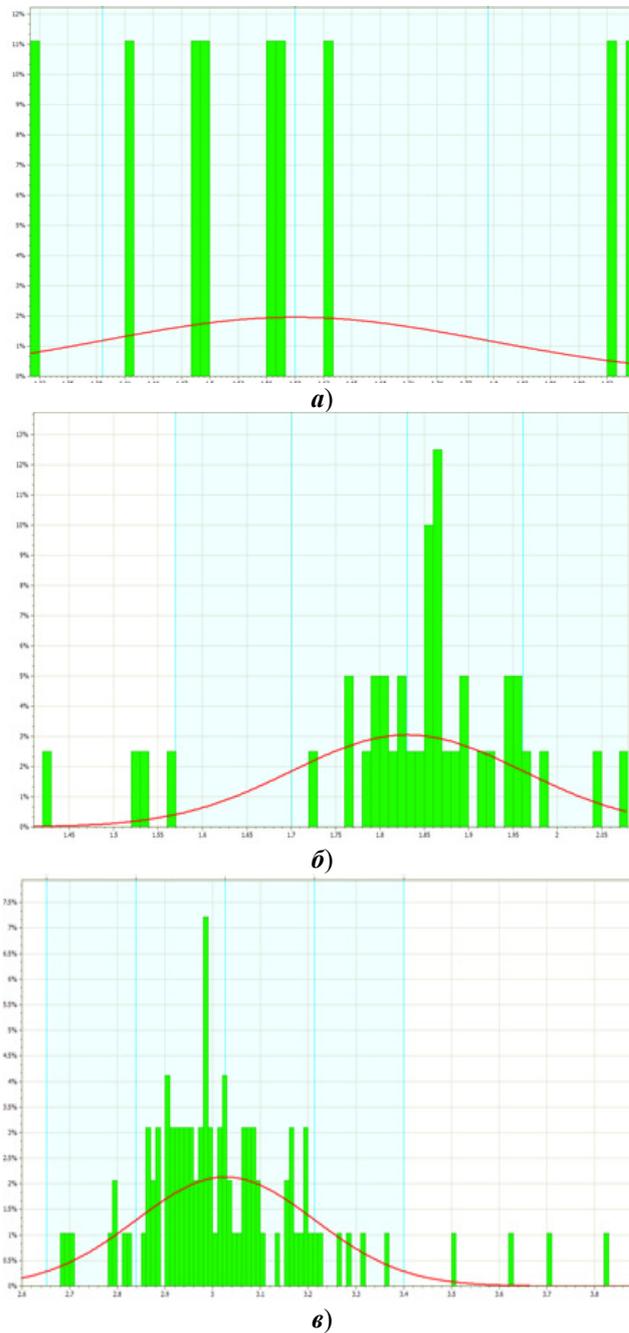


Рис. 7. Гистограмма значений объемного веса: **а** – в неминерализованной части коры выветривания; **б** – в минерализованной части коры выветривания; **в** – в зоне первичной минерализации

В расчете ОВ по зоне первичной минерализации участвовало 152 определения. Распределение значений ОВ по зоне первичной минерализации указывает на следующее: минимальное и максимальное значения составляют 2,59 и 3,82 г/см³ соответственно; среднее значение – 3,0 г/см³; основная масса значений концентрируется в пределах 2,6–3,4 г/см³. Значения свыше 3,4 г/см³ отсекались в качестве ураганных и не участвовали в расчетах среднего значения ОВ. При отсечении указанных значений средний объемный вес падает до 2,96 г/см³. Значения объемного веса могут присваиваться ячейкам блочной модели с помощью следующих методов: прямое присваивание значений ячейкам блочной модели; расчет значений для каждой ячейки с помощью формул регрессии; интерполяции значений.

После применения первого метода, т.е. значения объемного веса (насыпной плотности) присваивались каждой ячейке модели в соответствии со степенью окисления, каждой ячейке модели было присвоено определенное значение ОВ, которое впоследствии использовалось для определения объемов (тоннажа) ресурсов месторождения.

Содержания полезного компонента интерполировались в базовую блочную модель с помощью методов ординарного Кригинга (ОК) и обратных взвешенных расстояний (IDW) [14]. Метод IDW в квадрате и кубе использовался в качестве вспомогательного процесса для заверки определений по методу Кригинга. Содержания элементов интерполировались в базисную блочную модель в несколько этапов. Сначала проводилась интерполяция по блокам, оказавшимся в пределах контуров минерализации полезного компонента. Интерполяция по богатым и бедным зонам, а также по степени окисления проводилась отдельно. Радиус поискового эллипсоида и ориентация осей устанавливались исходя из результатов геостатистического анализа.

Первый поисковый радиус для всех минерализованных зон устанавливался равным 2/3 длин больших полей влияния полувариограммы во всех направлениях. Ячейки модели, которым не удалось получить содержания по результатам первой интерполяции, были использованы в следующей интерполяции с большим радиусом поиска, равным полным длинам полей влияния полувариограммы во всех направлениях. Ячейки модели, которым не удалось присвоить содержания по результатам первых двух интерполяций, были оценены с помощью радиуса поиска, увеличенного на всю длину поля влияния полувариограммы. В случае оценки ячеек модели с помощью радиуса, не превышающего полные поля влияния полувариограммы, применялось ограничение из как минимум трех проб из как минимум двух скважин для увеличения достоверности оценки. Общие сведения о проведенной интерполяции приведены в табл. 1.

Интерполяция блоков проводилась только с помощью аналитических композитов, ограниченных каркасными моделями, принадлежащими только соответствующим каркасам, т.е. каждый каркас оценивался индивидуально. Для дополнительной заверки содержаний, полученных по методу Кригинга, применялся алгоритм IDW в квадрате и кубе. Как IDW, так и ОК-процессы использовали одинаковые параметры поискового эллипса. Декластеризация проводилась во время интерполяции с помощью четырех секторов в пределах поискового соседства. Каждый сектор ограничивался максимум тремя точками. Таким образом, максимальное комбинированное допустимое количество

проб для интерполяции составило 12. Изменение параметров сопровождалось дискретизированием результатов оценки методом Кригинга. Данные точечные оценки являются простыми средними результатов оценки блоков. Полученная блочная модель проверена на предмет корреляции содержаний в блоках (рис. 8).

Таблица 1

Параметры проведенной интерполяции оценки содержания полезного компонента в блочной модели

Параметры интерполяции	Параметры интерполяции		
	Полииндикаторный кригинг (радиус поиска)		
	Меньше либо равно 2/3 диапазонов полувариограммы	Меньше либо равно двум диапазонам полувариограммы	Больше двух диапазонов полувариограммы
Минимальное количество проб	3	3	1
Максимальное количество проб	12	12	12
Минимальное количество скважин	2	2	1

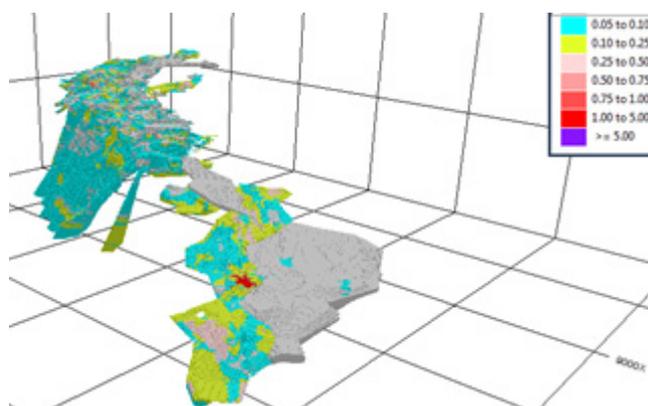


Рис. 8. Блочная модель месторождения

На основании полученной модели произведена классификация ресурсов месторождения [15, 16]. Принципы классификации минеральных ресурсов, примененные в данной работе, в первую очередь основаны на параметрах поиска и интерполяции, а также плотности разведочной сети. Кроме того, соблюдались определенные требования в части минимального количества проб и минимального количества скважин, вовлеченных в интерполяцию содержаний по каждому блоку. Ячейки модели выводились на экран в соответствующей цветовой кодировке согласно периоду выполнения интерполяции, наряду с пробами и траекторией скважин, границы между классами ресурсов интерпретировались в интерактивном режиме как на планах, так и на разрезах. В процессе оцифровки границ между классами в качестве основы применялась автоматическая классификация. Интерпретированные границы соединялись в каркасы и использовались для кодировки блочной модели для мине-

ральных ресурсов категории Indicated (исчисленные) и Measured (измеренные). В целом класс Measured (измеренные) минеральные ресурсы применялся относительно ячеек модели, заключенных в 2/3 диапазона вариограммы, а класс Indicated (исчисленные) минеральные ресурсы применялся по отношению к ячейкам модели, полностью включенным в диапазон вариограммы из новых скважин. Все прочие ячейки были классифицированы по категории ресурсов Inferred (предполагаемые) (рис. 9).

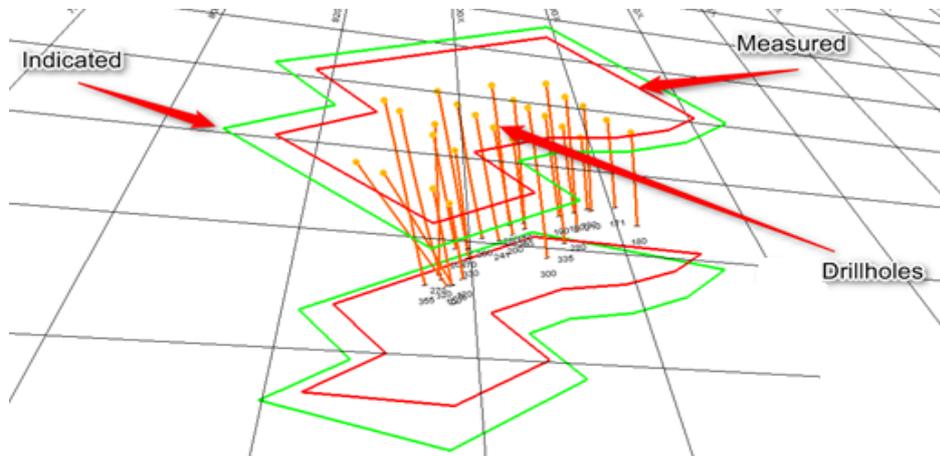


Рис. 9. Принципы классификации минеральных ресурсов месторождения

Характер распределения классификации минеральных ресурсов продемонстрирован на рис. 10 (цвета: красный – Measured (измеренные), зеленый – Indicated (исчисленные), синий – Inferred (предполагаемые)). Классификация минеральных ресурсов месторождения носит консервативный характер [17, 18]. Подсчет минеральных ресурсов месторождения основывался на оцененных содержаниях полезного компонента в блочной модели, пространственно ограниченной геологическими и статистическими параметрами для различных вариантов бортовых содержаний полезного компонента.

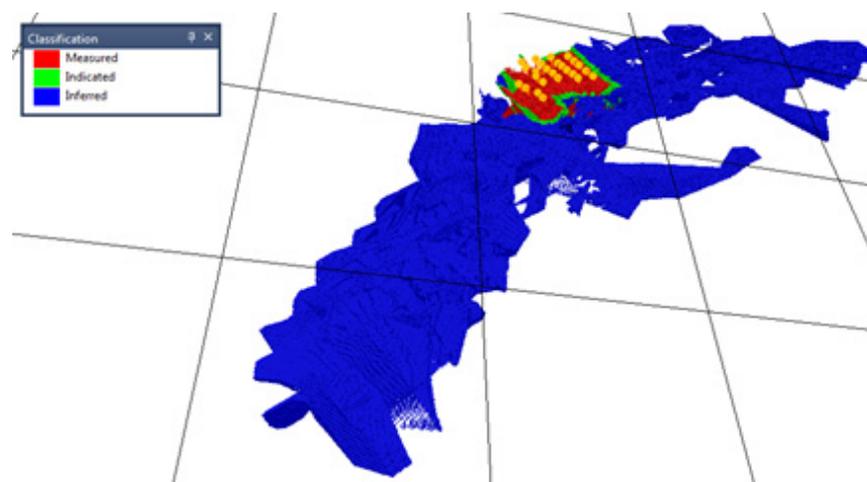


Рис. 10. Характер распределения минеральных ресурсов месторождения

Результаты и выводы

Таким образом, в целях улучшения будущих оценок минеральных ресурсов, а также для постановки новых объектов для увеличения ресурсной базы месторождения [19] рекомендуются следующие мероприятия:

- увеличить плотность буровой разведочной сети для получения новой информации по геологическому строению и морфологии рудных тел, при этом повысить категоричность минеральных ресурсов в рамках будущих подсчетов. В первую очередь бурение по сгущенной сети скважин необходимо провести вдоль простирания, уменьшая расстояние между профилями скважин;

- провести тщательное петрографическое изучение, проанализировав шлифы и образцы пород всех представительных минералогических ассоциаций основных литологических интервалов для лучшего понимания корреляции содержания полезного компонента с минералогическими ассоциациями. По результатам этого изучения подготовить коллекцию образцов пород по всем основным литологическим разностям для точной фиксации всех литологических данных и создания согласованной литологической трехмерной модели;

- провести дополнительное изучение коры выветривания для установления достоверной величины соотношения глинистого и глинисто-щебнистого типа коры выветривания;

- обновлять трехмерную модель минеральных ресурсов месторождения по мере получения новых данных.

Проведенные исследования подтвердили наличие перспективы прироста минеральных ресурсов месторождения, связанные с возможным снижением величины бортового содержания полезного компонента, в частности, в отношении приповерхностной зоны минерализации, издержки отработки которой будут значительно ниже в сравнении с подземной добычей.

Список литературы

1. Абабков К. В., Сулейманов Д. Д., Султанов Ш. Х., Котенев Ю. А., Варламов Д. И. Основы трехмерного цифрового геологического моделирования : учеб. пособие. Уфа : Нефтегазовое дело, 2008. 192 с.
2. Ахмадуллин Ф. Ф., Гильманова Р. Х., Грищенко А. С., Михеев Ю. В., Осепян С. С. Особенности 3D-геологического моделирования локальных клиноформ пласта БВ10/1-2 Самотлорского месторождения // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2009. № 12. С. 38–41.
3. Белозеров Б. В., Буторин А. В., Герасименко П. Н., Журавлева Е. В., Фаизов Р. З. Практические советы по 3D геологическому моделированию. СПб. : Газпром-нефть НТЦ, 2015. 354 с.
4. Воробьев В. С., Петров А. Н. Использование горизонтальных скважин при построении геологических моделей // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2017. № 12. С. 24–32.
5. Гладков Е. А. О корректности 3D-геолого-технологических моделей месторождений углеводородов // Oil & Gas Journal Russia. 2013. № 1-2. С. 50–55.
6. Гладков Е. А., Гладкова Е. Е. Трехмерная геолого-технологическая модель месторождения УВ на основе индивидуальной поскважинной адаптации // Газовая промышленность. 2010. № 5. С. 36–39.

7. Боженюк Н. Н. Уточнение петрофизических данных и подбор оптимальных параметров построения геологической модели // Нефтяное хозяйство. 2015. № 7. С. 72–75.
8. Мангазеев В. П., Белозеров В. Б., Кошовкин И. Н., Рязанов А. В. Методика отображения в цифровой геологической модели литолого-фациальных особенностей терригенного коллектора // Нефтяное хозяйство. 2006. № 5. С. 66–70.
9. Забоева А. А. Разработка методик трехмерного геомоделирования в условиях неоднородности и неравномерности геологогеофизической информации (на примере месторождений Западной Сибири) : дис. ... канд. геолого-минералогических наук. Тюмень, 2012. 154 с.
10. Потехин Д. В. Оптимизация технологии многовариантного трехмерного геологического моделирования залежей нефти и газа : дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2014. 151 с.
11. Байков В. А., Бакиров Н. К., Яковлев А. А. Математическая геология. Т. 1. Введение в геостатистику. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2012. 228 с.
12. Гончаренко С. Н., Бердалиев Б. А. Когнитивное моделирование технологических регламентов функционирования геотехнологического полигона на базе векторно-матричного анализа эксплуатационных ячеек // Революция в управлении: новая цифровая экономика или новый мир машин : сб. материалов II Междунар. науч. форума «Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика». Вып. 2. М. : Изд. дом ГУУ, 2018. С. 448–455.
13. Гончаренко С. Н., Бердалиев Б. А. Повышение эффективности управления горнодобывающего предприятия на основе исследования системных связей технологических переделов и моделей данных процессов технического перевооружения // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 11. С. 77–82.
14. Ковалевский Е. В. Геологическое моделирование на основе геостатистики : учеб. курс. Москва : Центральная геофизическая экспедиция, 2011. 119 с.
15. Подрезов Д. Р. Методы и модели идентификации запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана // Прикаспийский журнал. Управление и высокие технологии. 2020. № 2. С. 32–43. doi:10.21672/2074-1707.2020.50.2.032-043
16. Подрезов Д. Р. Моделирование показателей функционирования геотехнологических блоков и движения вскрытых запасов рудника подземного скважинного выщелачивания урана // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2020. № 47. С. 98–107. doi:10.21822/2073-6185-2020-47-2-98-107
17. Бердалиев Б. А. Повышение эффективности функционирования уранодобывающего предприятия на основе моделирования и оптимизации процессов добычи и переработки продуктивных растворов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 2. С. 208–214.
18. Гончаренко С. Н., Бердалиев Б. А. Методы прогнозирования и оценки техногенного и остаточного скопления урановых руд на месторождениях, обрабатываемых способом подземного скважинного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 5. С. 43–48. doi:10.25018/0236-1493-2018-5-0-43-48
19. Дементьев А. А. Компьютерная модель расчета технико-экономических показателей (на примере месторождений урана для разработки подземным выщелачиванием) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999. № 2. С. 169–175.

References

1. Ababkov K.V., Suleymanov D.D., Sultanov Sh.Kh., Kotenev Yu.A., Varlamov D.I. *Osnovy trekhmernogo tsifrovogo geologicheskogo modelirovaniya: uchebnoe posobie = Basics of 3D digital geological modeling: teaching aid*. Ufa: Neftegazovoe delo, 2008:192. (In Russ.)

2. Akhmadullin F.F., Gil'manova R.Kh., Grishchenko A.S., Mikheev Yu.V., Osepyan S.S. Features of 3D geological modeling of local clinofolds of the BV10/1-2 reservoir of the Samotlor field. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* = *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2009;12:38–41. (In Russ.)
3. Belozеров B.V., Butorin A.V., Gerasimenko P.N., Zhuravleva E.V., Faizov R.Z. *Prakticheskie sovety po 3D geologicheskomu modelirovaniyu* = *Practical tips for 3D geological modeling*. Saint-Petersburg: Gazprom-neft' NTTs, 2015:354. (In Russ.)
4. Vorob'ev V.S., Petrov A.N. The use of horizontal wells in the construction of geological models. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* = *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2017;12:24–32. (In Russ.)
5. Gladkov E.A. On the correctness of 3D geological and technological models of hydrocarbon deposits. *Oil & Gas Journal Russia*. 2013;1-2:50–55. (In Russ.)
6. Gladkov E.A., Gladkova E.E. 3D geological and technological model of hydrocarbon deposit based on individual downhole adaptation. *Gazovaya promyshlennost'*. = *Gas industry*. 2010;5:36–39. (In Russ.)
7. Bozhenyuk N.N. Refinement of petrophysical data and selection of optimal parameters for building a geological model. *Neftyanoe khozyaystvo* = *Oil industry*. 2015;7:72–75. (In Russ.)
8. Mangazeev V.P., Belozеров V.B., Koshovkin I.N., Ryazanov A.V. Methods for displaying lithological-facies features of a terrigenous reservoir in a digital geological model. *Neftyanoe khozyaystvo* = *Oil industry*. 2006;5:66–70. (In Russ.)
9. Zaboeva A.A. *Razrabotka metodik trekhmernogo geomodelirovaniya v usloviyakh neodnorodnosti i neravnomernosti geologogefizicheskoy informatsii (na primere mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri): dis. kand. geologo-mineralogicheskikh nauk* = *Development of techniques for three-dimensional geomodeling in conditions of heterogeneity and unevenness of geological and geophysical information (on the example of fields in Western Siberia): dissertation to apply for the degree of the candidate of geological and mineralogical sciences*. Tyumen, 2012:154. (In Russ.)
10. Potekhin D.V. *Optimizatsiya tekhnologii mnogovariantnogo trekhmernogo geologicheskogo modelirovaniya zalezhey nefi i gaza: dis. kand. tekhn. nauk* = *Optimization of the technology of multivariate 3D geological modeling of oil and gas deposits: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences*. Perm, 2014:151. (In Russ.)
11. Baykov V.A., Bakirov N.K., Yakovlev A.A. *Matematicheskaya geologiya. T. 1. Vvedenie v geostatistiku* = *Mathematical geology. Volume 1. Introduction to Geostatistics*. Moscow; Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2012:228. (In Russ.)
12. Goncharenko S.N., Berdaliev B.A. Cognitive modeling of technological regulations for the functioning of a geotechnological test site based on vector-matrix analysis of operational cells. *Revolutsiya v upravlenii: novaya tsifrovaya ekonomika ili novyy mir mashin: sb. materialov II Mezhdunar. nauch. foruma «Shag v budushchee: iskusstvennyy intellekt i tsifrovaya ekonomika»* = *A revolution in management: a new digital economy or a new world of machines: proceedings of the 2nd International scientific forum "Step into the future: artificial intelligence and the digital economy"*. Issue. 2. Moscow: Izd. dom GUU, 2018:448–455. (In Russ.)
13. Goncharenko S.N., Berdaliev B.A. Improving the management efficiency of a mining enterprise based on the study of systemic connections of technological conversions and models of these processes of technical re-equipment. *Voprosy radioelektroniki* = *Radio electronics issues*. 2017;11:77–82. (In Russ.)
14. Kovalevskiy E.V. *Geologicheskoe modelirovanie na osnove geostatistiki: ucheb. kurs* = *Geological modeling based on geostatistics: teaching aid*. Moscow: Tsentral'naya geofizicheskaya ekspeditsiya, 2011:119. (In Russ.)
15. Podrezov D.R. Methods and models for identification of reserves of technological blocks of an underground leaching of uranium mine. *Prikaspiyskiy zhurnal. Upravlenie*

- i vysokie tekhnologii = Caspian journal. Management and high technology*. 2020;2:32–43. (In Russ.). doi:10.21672/2074-1707.2020.50.2.032-043
16. Podrezov D.R. Modeling the performance indicators of geotechnological blocks and the movement of the discovered reserves of the mine of underground borehole leaching of uranium. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Daghestan State Technical University. Engineering sciences*. 2020;47:98–107. (In Russ.). doi:10.21822/2073-6185-2020-47-2-98-107
17. Berdaliev B.A. Improving the efficiency of the functioning of a uranium mining enterprise based on modeling and optimization of the processes of mining and processing of productive solutions. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin*. 2018;2:208–214. (In Russ.)
18. Goncharenko S.N., Berdaliev B.A. Methods for predicting and assessing technogenic and residual accumulations of uranium ores in deposits mined by logging leaching. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin*. 2018;5:43–48. (In Russ.). doi:10.25018/0236-1493-2018-5-0-43-48
19. Dement'ev A.A. Computer model for calculating technical and economic indicators (on the example of uranium deposits for development by underground leaching). *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin*. 1999;2:169–175. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Николаевич Гончаренко

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматизированных
систем управления, Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСиС» (Россия,
г. Москва, Ленинский проспект, 4)

E-mail: gs16@mail.ru

Sergey N. Goncharenko

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of automated control systems,
National University of Science
and Technology MISIS (4 Leninsky
avenue, Moscow, Russia)

Поступила в редакцию / Received 11.01.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 17.02.2021

Принята к публикации / Accepted 25.02.2021