УДК 553.3/4:553.411

С.В.СЕНДЕК, *канд. геол.-минерал. наук*, *профессор*, grmpi@yandex.ru
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

S.V.SENDEK, *PhDr. g.-m. Sci*., *Professor*, grmpi@yandex.ru
Saint-Petersburg State Mining Institute (*Technical University*)

ПРОЯВЛЕНИЕ ЭНТРОПИЙНОГО ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ ЗОЛОТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОРУДЕНЕНИЯ

На разном масштабном уровне обнаруживается закономерность энтропийного распределения масс золота в рудах. Эта закономерность является следствием и результатом перераспределения первичного состояния золотосодержащих минералов и пород. Обнаружение таких закономерностей позволяет по-новому оценивать и задумываться о генезисе и природе золотого оруденения.

***Ключевые слова*:** месторождения золота, масса золота, частотное распределение, массовое распределение, энтропийное распределение массы золота, типы руд.

APPEARANCE OF ENTROPY PRINCIPLE IN DISTRIBUTION OF THE GOLD MASS WHILE FORMATION OF MINABLE GOLD MINERALIZATION

The rule of the entropy distributiveness for mass of the metal in gold ores is detected at different scale levels. This regularity is resulted as a consequence of redistribution of the gold and host rocks after their primary conditions. Revealing of those rules may allow reviewing the notions on nature and genesis of gold mineralizaition.

***Key words*:** gold deposits, gold mass, distribution of number samples, distribution of gold mass, entropy principle in distribution of the gold mass, types of ores.

Введение. Исследования качественных и количественных особенностей распределений золота в рудах промышленных месторождений составляют важную сторону не только изучения и оценки собственно промышленной значимости оруденения, но и выявления генетической природы рудообразования [10]. Многолетние исследования промышленных руд различных по формационно-генетической природе золоторудных месторождений Северо-Востока России позволили четко распознавать главные стадийные золотосодержащие минеральные ассоциации и их количественные соотношения по массе золота в рудах. Это, в свою очередь, дало возможность оценивать продуктивность золоторудных минеральных ассоциаций, определять их объемные и структурные параметры в рудных телах и тем самым методически правильно осуществлять геолого-разведочные работы либо критически оценивать ранее выполненные заключения.

Изучая и систематизируя материалы по опробованию разнотипных руд хорошо разведанных и эксплуатируемых месторождений типа минерализованных зон с упорными прожилково-вкрапленными сульфидсодержащими и золотокварцевыми рудами (Нежданинское, Наталкинское месторождения), месторождений жильного золотокварцевого и дайкового типов (Игуменовское, Светлинское, Штурмовское, Утинское и др.), удалось выявить новые, ранее не отмеченные, общие для разных формационных

типов месторождений закономерности распределений массы золота в рудах.

В современной геологической практике основополагающей мерой при раскрытии и анализе закономерностей распределения металлов в рудном теле, в нашем случае золота, является его содержание. Именно содержание металла характеризует степень богатства руд, дает возможность типизировать месторождения, рудные тела, отдельные блоки в пределах рудных тел, позволяет оконтуривать промышленные и забалансовые руды, подсчитывать запасы.

Помимо чисто прикладных задач, содержание металла в руде характеризует генетическую сторону рудообразования. Как было показано А.В.Канцелем [4] и позднее нами [10], функциональная аппроксимация содержаний металла в руде дает возможность получить ряд кривых распределения, отражающих скорость процесса рудообразования и его термодинамические условия.

Если в процессе формирования руд какого-то типа термодинамические условия оказываются относительно стабильными за период рудообразования, то взятые пробы концентраций металла образуют на градуированной шкале содержаний нормальную или логарифмическую кривую. Значения дисперсий содержания металлов во всех пробах будут незначительными.

Если же рудное тело сформировано в процессе многостадийного оруденения с изменяющимися во времени термодинамическими условиями рудообразования, то общая картина такого частотного распределения проб будет весьма сложной – в виде кривой, растянутой по градуированной шкале содержаний, иногда с несколькими максимумами, что отражает большую дисперсию начальных и конечных условий среды рудообразования.

Максимумы частотного распределения проб и дисперсий для различных рудных тел и месторождений золота широко используются в практике геолого-разведочных работ. Прежде всего, эти данные необходимы для составления вероятностно-статистических моделей распределения золота в рудах, используемых для выявления оптимальных плотностей разведочно-поисковых сетей, прогнозирования ураганных проб, самородного золота крупного размера и т.д.

При всей важности использования данных частотного распределения проб, взятых из рудных тел и раскрывающих их внутреннее неоднородное строение как следствие совмещения разнородных минеральных ассоциаций, всегда возникает вопрос: из каких составных парагенетических ассоциаций складывается усредненная концентрация золота в рудном теле, какая доля золота в этой неоднородности является превалирующей по массе и чем она представлена?

Для месторождений россыпного золота на стадии как поисково-разведочных, так и эксплуатационных работ всегда анализируется гранулометрический состав поднятого золота и масса гранулометрических фракций, что дает однозначный ответ о генетическом и промышленном типе россыпей [14].

В коренных месторождениях размер зерен золота по фракциям и их соотношения по массе определяются по данным технологического опробования природных типов руд с целью выработки рациональной схемы извлечения золота. После специальных минералогических и геолого-структурных исследований выявляется общая картина распределения золота в рудах, что позволяет раскрывать закономерности размещения промышленного оруденения на месторождениях и в их рудных телах.

Вместе с тем проведенные в полной мере технологические исследования руд коренных месторождений золота устанавливают факт создания типа руд и его особенность с точки зрения вещественного состава и форм нахождения золота. Эти данные не раскрывают временны́е, стадийные, морфологические и количественные особенности накопления массы золота в процессе изменяющейся термодинамической обстановки рудообразования, не отвечают на вопросы, как происходит преобразование золота под действием внутрирудных метаморфических явлений и какие процессы управляют локализацией золота в рудах.

Чтобы решить поставленные задачи, необходимо изучить количественные соот-

ношения массы золота, приходящейся на каждый временной интервал рудообразующего процесса. В коренных месторождениях такой величиной является метрограмм, отражающий для крутопадающих рудных тел – линейный, а для пологозалегающих тел – вертикальный запас золота. Эта величина, хотя и является взвешенной, определяет количество золота, приходящееся на единицу площади рудного тела или продуктивность золота в данном сечении рудного тела.

Метрограмм определяется как произведение содержания золота в пробе *c* в граммах на тонну на длину этой бороздовой пробы *m* в метрах. Метрограммы анализируются применительно к той или иной разновидности руд совместно с частотным распределением проб по той же градуированной шкале содержаний золота. В каждый класс градуированной шкалы помещается то значение метрограмма, которое соответствует взятому значению содержания золота. Таким образом, на единой градуированной шкале содержаний отстраивается кривая частотного распределения проб – число проб на каждый выбранный класс *n*, кривая или гистограмма количественных значений *mc* в каждом классе – распределение массы золота. В случае большого числа проб *n* и значений *mc* целесообразно отображать их в процентах к общему количеству.

Такова техническая, формальная часть исследовательских работ, но она обязательно должна быть выполнена для однотипного по времени формирования и вещественному составу рудного тела или его составного компонента. Следовательно, геологическое изучение исследуемого объекта, его оконтуривание, опробование, изучение вещественного состава являются первоосновой для последующего истолкования полученных данных распределения.

Изучение распределения массы золота в рудах месторождений типа минерализованных зон. В качестве объекта исследований выбрано Нежданинское золоторудное месторождение. Оно обнажено эрозионным срезом более 700 м по вертикали и на этом интервале вскрыто многочисленными штольневыми выработками. Глубже оруденение прослежено шахтными выработками. По данным буровых скважин, общая вертикальная составляющая превышает 1,5 км. По многокилометровым выработкам за периоды разведочных и эксплуатационных работ составлены геологические планы штольневых горизонтов и разрезов по восстающим выработкам, по данным бороздового опробования получены десятки тысяч пробирных анализов руд. Такой объем фактического материала при его обработке исключает возможность случайных и неопределенных суждений на основе малой представительности данных.

Геологическое строение Нежданинского месторождения освещено во многих публикациях [3, 7, 9, 11, 12]. Месторождение принадлежит к структурно-морфологическому типу минерализованных зон дробления и смятия терригенных черносланцевых пород и относится к золотосульфидно-кварцевой формации.

Рудные тела месторождения представлены многокилометровыми крутопадающими зонами катаклаза, рассланцевания и милонитизации аргиллито-алевролитовых пород и альбит-карбонатно-кварцевыми жилами. Жилы разнотипны и разновременны по условиям формирования и поэтому могут встречаться за пределами минерализованных зон, приуроченных к маломощным трещинным структурам, вдоль, поперек или по диагонали к главным рудовмещающим структурам. В самих минерализованных зонах собственно жильные кварцевые тела представляют фрагментные выполнения маломощных сколовых и отрывных структур среди преобразованных и оруденелых пород.

Характерной особенностью главных рудовмещающих тел – минерализованных зон является длительность и стадийность оруденения. Исследователи выделяют от 7 до 11 разновременных минеральных ассоциаций, включая и те, формирование которых хотя и не связано с существенным привносом и образованием новых минеральных форм, но в силу изменившихся физико-химических условий вызвало серьезные метаморфические преобразования ранее созданных минеральных парагенезисов.

Оруденение на Нежданинском месторождении было сформировано в два этапа, разделенных внедрением даек диоритовых порфиритов [11]. С начальным этапом прогрессивного развития термодинамического воздействия на рудное поле и особенно на деформационные разрывные структуры песчано-алевролит-аргиллитовых пермских пород связано становление основных рудовмещающих структур. На этом этапе были сформированы дислоцированные и в разной степени окварцованные породы минерализованных зон. В них образовалась вначале тонкая пылевидная сульфидная вкрапленность, затем видоизмененная прожилково-вкрапленная минерализация, сопровождавшаяся тонкими кварцевыми, карбонат-кварцевыми, кварц-сульфидными прожилками. Основные рудные минералы – пирит и арсенопирит, с которыми связывается золотоносность руд, поскольку в концентратах этих минералов, особенно в арсенопирите, установлены высокие содержания дисперсного золота. Несмотря на то, что содержание золота в оруденелых породах низкое, на уровне нескольких граммов на тонну, именно с этими прожилково-вкрапленными рудами связаны главные массы золота минерализованных зон месторождения. По ним фактически проводится оконтуривание промышленных рудных блоков в минерализованных зонах.

Завершают первый этап процессы метасоматического прокварцевания ранее оруденелых и рассланцованных пород. В таких метасоматитах, имеющих более монолитный роговиковоподобный вид, наблюдаются теневые включения первичных измененных пород. Нередко на участках такого прокварцевания вдоль структур рассланцевания фиксируются маломощные кварцевые инъекционные прожилки. В них отмечается убогая вкрапленность халькопирита, теннантита, пирита, арсенопирита. Со скоплениями сульфидов в рудах связаны тонкие и мелкие выделения ксеноморфных золотин.

Второй, последайковый, этап начинается в обстановке существенных структурных преобразований рудного поля, когда рудное минералообразование отмечается и за пределами минерализованных зон в виде преимущественно инъекционных, существенно кварцевых жил и участков прожилкования в малоизмененных алевролитах и аргиллитах. Такие жильные серии занимают поперечную или диагональную позицию по отношению к главным минерализованным зонам. В то же время в пределах минерализованных зон фрагментарно отмечаются аналогичные маломощные кварцево-жильные образования, приуроченные к контактным зонам милонитизированных и рассланцованных оруденелых пород.

Начальные стадии второго этапа знаменуются появлением кварцевых, анкерит-кварцевых, альбит-анкерит-кварцевых маломощных жил и прожилков с шеелитом, крупнозернистым арсенопиритом, реже пиритом. Продуктивность на золото этих минеральных ассоциаций ничтожна.

Последующие стадии минералообразования сопровождались многократно меняющимися сбросо- и взбрососдвиговыми деформациями оруденелых пород минерализованных зон, преобразованных в крупные, местами растащенные или, наоборот, совмещенные в зоне линзовидные блоки. В них отмечаются участки брекчирования, рассланцевания вплоть до милонитизированного состояния. Именно по таким деформированным породам и рудам развиваются кварцевые метасоматиты с характерными текстурными рисунками многоактных брекчий, рассланцованности, прожилковых пересечений и т.п.

С такими процессами интенсивного метасоматического минералообразования связываются наиболее ярко проявленные интраминерализационные метаморфические изменения ранних оруденелых пород и руд (перекристаллизация, разложение ранних сульфидных зерен и новообразование новых, появление тонкого и мелкого золота за счет высвобождения из разложенных сульфидов и др.).

Дальнейшие стадии второго этапа, наиболее контрастно проявленные, представлены преимущественно маломощными инъекционными кварцевыми жилами и сопровождающими их в ореоле нескольких метров

тонкими оперяющими прожилками аналогичного состава. С этими жилами связана вкрапленная золотосульфидно-сульфосольная продуктивная ассоциация. Основные рудные минералы здесь – идиоморфные мелкие кристаллы дипирамидального и призматического арсенопирита, агрегатные срастания мелких зерен пирита, сфалерита, галенита, тетраэдрита и призматически-игольчатые кристаллы джемсонита, буланжерита, бурнонита. Золото встречается в виде сравнительно мелких ксеноморфных зерен в срастаниях с сульфидами или занимает концевые грани зерен сульфосолей. Встречаются и более идиоморфные выделения золота в кварце. Пробность золота этой ассоциации составляет от 700 до 830.

Завершается рудообразование на Нежданинском месторождении появлением своеобразных парагенезисов серебряной минерализации (прустит, пираргирит, фрайбергит, тетраэдрит с самородным серебром, электрум). Эта минерализация наблюдается на флангах рудных зон и может рассматриваться как локальная по масштабу рудообразования.

Интенсивность и широта проявления каждой последующей стадии второго этапа снижаются. И хотя для каждой из стадий характерен ритм температурных инверсий, с которыми связаны активные интраминерализационные воздействия на ранее сформированные породы и руды, в целом рудообразование второго этапа проходит в условиях регрессии теплового потока.

Специфика двухэтапного рудообразования в пределах единых минерализованных зон отражается и на геохимических соотношениях золота с рудообразующими элементами. Так, для руд первого этапа, не затронутых более поздними процессами метаморфизма, характерна положительная корреляция золота с мышьяком, медью, цинком и менее значимые связи с никелем, кобальтом. У руд второго этапа золото больше ассоциируется с сурьмой, свинцом, цинком, серебром. При совмещении оруденений обоих этапов все эти связи нарушаются, общая картина массовых спектрохимических анализов с точки зрения коррелятивных соотношений металлов становится как бы «размазанной». Это лишний раз подтверждает сложную природу оруденения в минерализованных зонах с весьма существенной особенностью внутрирудных преобразований ранних продуктивных золотосодержащих парагенезисов более поздними, при существенном изменении ранних и поздних термодинамических условий рудообразования.

Количественные соотношения золота анализировались применительно к различным типам руд, составлявшим минерализованную зону № 1 Нежданинского месторождения. Распределение числа проб и метрограммов золота выполнялось в координатах: абсцисса – градуированная логарифмическая нормальная или двоичная шкала классов содержаний золота в пробах *c*; ордината – величины *n* и *mc* в процентах.

Во всех исследованиях принята следующая шкала классов содержаний:

Класс		*c*, г/т
1	.....	< 0,25
2	.....	0,25-0,5
3	.....	0,5-1,0
	.....	
13	.....	512-1024
14	.....	1024-2048
15	.....	2048-4096

Вначале анализировалось распределение массы золота для прожилково-вкрапленных руд первого этапа. Для них характерно общее рассланцевание алевролитов с тонкой кварц-карбонатной прожилковатостью и тонкими вкраплениями пирита и арсенопирита. Макроскопически в этих рудах интраминерализационных преобразований не видно, что подтверждается схожестью частотных распределений проб по классам содержаний во всех штольневых горизонтах. Совпадают и средние содержания золота в опробованных породах, что говорит об однотипности оруденения.

Однако под микроскопом в этих рудах в пределах эрозионного среза по штольневым горизонтам обнаруживается хорошо выраженная изменчивость, заключающаяся в том, что с глубиной, на более низких гори-

зонтах, в породной массе появляются минеральные новообразования в виде тонкого метасоматического и сетчато-прожилкового кварца с альбитом, карбонатами, серицитом, хлоритом. Отмечаются более крупные единичные зерна пирита и арсенопирита около этих минеральных новообразований.

Анализ распределений массы золота от верхних горизонтов к нижним приведен в табл.1.

Поскольку средние содержания золота в анализируемых рудах близки, а число проб по горизонтам оказалось различным, для сравнения взяты соотношения метрограммов по классам содержаний в процентах.

Из приведенных расчетов видно, что при общей схожести распределения метрограммов по классам содержаний, конфигурация кривых распределения массы и числа проб последовательно изменяется от верхнего уровня – штольни 5 к нижнему – штольне 1. Это выражается в направленном снижении максимума распределения и возрастанию дисперсии. От верхнего горизонта к нижнему происходит перемещение массы золота из низких классов содержаний к более высоким, с образованием единичных проб с более высокими содержаниями золота (рис.1).

Если между штольнями 5 и 2 еще сохраняется масштабность распределений метрограммов по классам (рис.1, *а*), то на нижнем уровне массовость перегруппировки первичного золота весьма существенна: исчезает максимум в классе 5 за счет перегруппировки золота в классы 7-9, а в классах 4 и 5 формируется одинаковая по значимости масса золота, равная 19 % (рис.1, *б*).

Еще более значимые изменения первичных руд были выявлены нами в штреке 1/3 штольни 3, пройденном по рудному телу для заверки сплошности его по простиранию. Здесь вдоль контакта основной интенсивно окварцованной и минерализованной части рудной зоны, выделяемой как собственно обогащенное рудное тело, в первичных прожилково-вкрапленных рудах видны сильные преобразования в виде метасоматического прокварцевания, осветления. Порода внешне напоминает роговик, в котором крайне мало пирита и арсенопирита, причем большинство зерен этих минералов корродированы и разрушены. Всего было проанализировано 40 сечений на полную мощность и по этим пробам определены частотное и массовое распределения (рис.2).

Частотное распределение фактически аналогично таковым, выполненным для прожилково-вкрапленных руд других участков. Массовое распределение обнаруживает еще более значительное смещение метрограммов в сторону более высоких классов градуированной шкалы, причем с 5-го по 8-й классы распределение равномерное, в интервале 19-21 %.

Можно предполагать, что золото в первичных прожилково-вкрапленных рудах чрезвычайно тонкое и дисперсное, присутствует, возможно, на уровне наночастиц в оруденелом сланцевом углеродистом субстрате или находится в структурах пиритов и арсенопиритов [6]. Последнее более вероятно, поскольку, как уже говорилось, в концентратах этих минералов золото присутствует в количестве десятков и сотен граммов на тонну. На приведенных диаграммах (рис.1, 2) видно, что в результате метаморфизма первичных руд от верхнего штольневого горизонта к нижним изменяются распределения массы золота на градуированной шкале при одновременном близком сохранении общей массы золота в руде. Такое явление может рассматриваться как проявление перегруппировки частиц золота, его перекристаллизации и, вероятно, высвобождения из сульфидов и матричной основы оруденелых углеродистых пород.

По данным А.А.Абдулина, В.Н.Матвиенко, В.А.Нарсеева [1], золото в прожилково-вкрапленных рудах углеродистых сланцевых пород с пирит-арсенопиритовым содержанием (месторождения Бакырчик, Кумтор, Амантайтау, Даугызтау и др.) представлено миграционно-способными формами – ионной и коллоидной, преобладающими над собственно самородным золотом в отношении 85-90 и 10-15 % соответственно. Возможно, что на Нежданинском месторождении мы имеем аналогичную ситуацию. Метаморфические воздействия первичных руд

Таблица 1

Распределение массы золота по штольневым горизонтам в первичных прожилково-вкрапленных рудах

Номер штольни; число проб; *n*, %; *mc*, м·г/т; *mc*, %	Класс содержаний золота									Сумма *mc*, м·г/т	Общая длина проб, м	Среднее содержание золота, г/т
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Штольня 5												
Проб 432	82	73	92	95	76	13	1				411,35	
n,%	19	16,9	21,3	22	17,6	3	0,2					
mc, м·г/т	15,82	28,39	74,35	142,1	198,61	57,08	10,56			526,91		1,28
mc, %	3,0	5,4	14,1	27,0	37,7	10,8	2,0					
Штольня 2												
Проб 539	73	90	102	114	113	37	9	1			505,4	
n, %	13,5	16,7	18,9	21,1	21	6,9	1,7	0,2				
mc, м·г/т	14,02	33,84	74,67	161,24	308,09	182,49	93,68	17,08		855,11		1,69
mc, %	1,6	3,9	8,7	18,8	36,0	21,3	10,95	2,0				
Штольня 1												
Проб 871	166	189	202	171	94	34	8	3	4		823,45	
n, %	19	21,7	23,2	19,6	10,8	3,9	0,9	0,3	0,4			
mc, м·г/т	10,48	74,83	143,34	237,87	240,19	170,59	150,85	39,50	188,26	1259,91		1,52
mc, %	0,8	5,9	11,4	18,9	19,1	13,5	11,9	3,1	14,9			

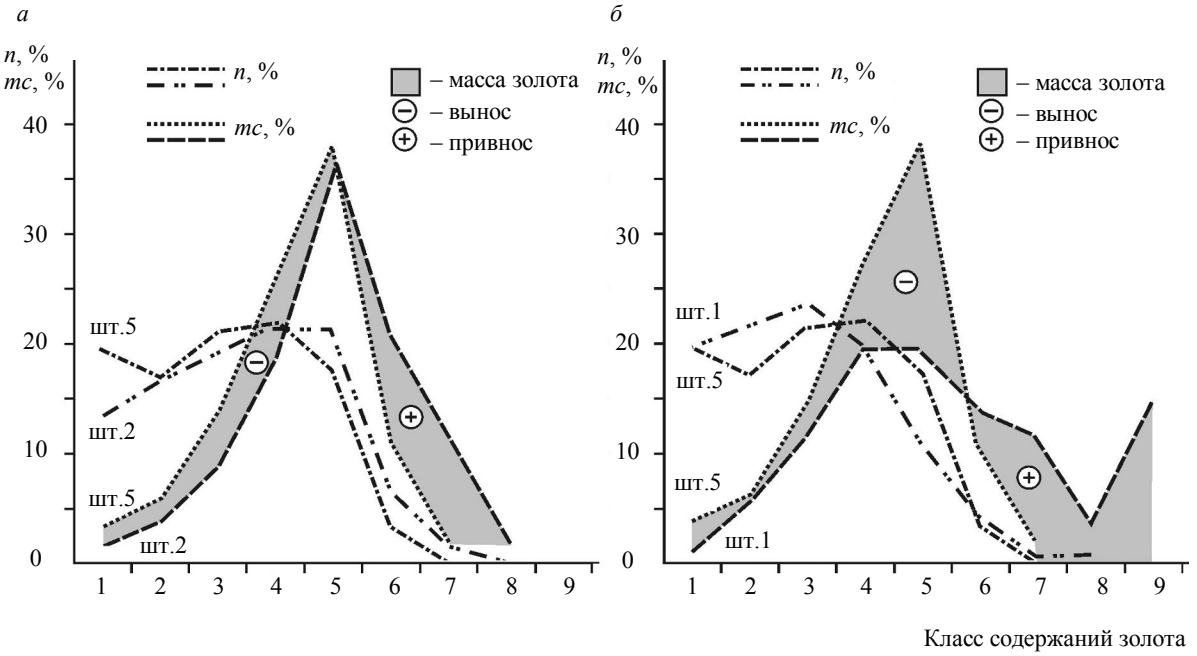


Рис.1. Распределение числа проб и массы золота в первичных прожилково-вкрапленных рудах Нежданинского месторождения: *а* – сопоставление по штольням 5 и 2; *б* – сопоставление по штольням 5 и 1

способствуют перераспределению золота с возникновением относительно более крупных зерен за счет более мелких, тонких.

Наиболее значимым событием перегруппировки золота является возникновение логарифмически-нормальной равномерной

закономерности распределений массы золота по двоичной шкале при укрупнении его частиц. Если это действительно закономерность, а не случайность, то подобное явление обязательно должно наблюдаться в тех случаях, когда в оруденелых породах широко проявлены процессы интрарудных метаморфических преобразований и перераспределений массы золота.

На Нежданинском месторождении таким условиям в полной мере удовлетворяют основные прожилково-вкрапленные руды, характеризующиеся многостадийностью рудообразования, проявлением различных генераций пиритов, арсенопиритов, присутствием галенита, сфалерита, блеклых руд и других сульфидов. Этим рудам свойственны неоднородная текстура, проявление раннего брекчирования и последующего метасоматического и прожилкового прокварцевания, с образованием теневых включений оруденелых алевролитов. По данным многочисленных шлифов, аншлифов и протолочек из этих руд, установлено, что в рудах встречаются тонкие и мелкие зерна золота, как в срастаниях с сульфидами, так и свободные в породной массе руды. Интраминерализационные метаморфические преобразования выражены в этих рудах наиболее контрастно.

Изучение особенностей распределения массы золота в этих рудах проведено нами по штольням 1-3, в которых вскрыты наиболее значительные по протяженности фрагменты тел (табл.2).

Анализ выполненных распределений (рис.3) свидетельствует о тождественности типов руд по всем трем штольневым горизонтам, что характеризует, во-первых, близость средних концентраций золота в них и, во-вторых, полную однотипность частотного распределения.

Аналогия в распределении массы золота прослеживается у первых пяти классов шкалы. Распределения массы золота этих классов полностью сходны у наиболее сильно метаморфизованных первичных прожилково-вкрапленных руд из штольни 1 и штрека 1/3 (см. рис.1, 2). Следовательно, в рассматриваемых рудах тонкого золота практически нет, оно все преобразовано.

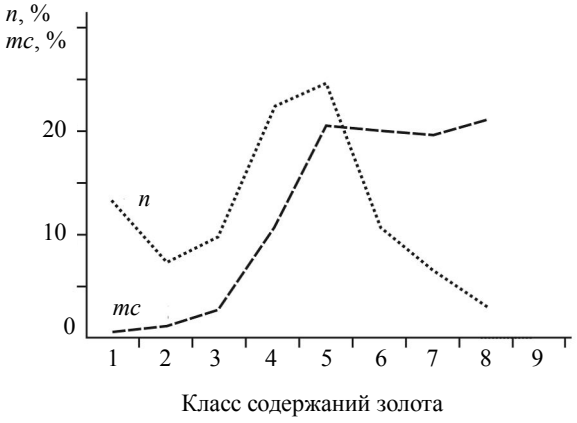


Рис.2. Распределение числа проб и массы золота в ороговикованных первичных прожилково-вкрапленных рудах Нежданинского месторождения, штрек 1/3

Распределение по более высоким классам шкалы, также отражает общую тенденцию к некой усредненности массы в 7-9-х классах, но малое число проб в каждом из штольневых горизонтов не может гарантировать достоверность полученных данных, что и отмечается в виде разброса значений в классах в 2-3 раза. Общая картина распределений по всем трем штольневым горизонтам более определенно свидетельствует, что после достижения максимума массы золота в 6-м классе в следующих 7-9-м классах фиксируется равномерное логарифмически-нормальное распределение массы золота в интервале 8-12 %.

Чтобы подтвердить эту закономерность, в табл.2 и на рис.3 приведено частотное и массовое распределения золота по всей штольне 2, включая все типы руд составляющих рудную зону. Здесь с 7-го по 10-й классы отчетливо устанавливается равномерное логарифмически-нормальное распределение массы золота в интервале 8-11 %.

Теоретически возникающие закономерности распределений массы золота можно трактовать как следствие проявления энтропийного закона. В термодинамике состояние системы в виде ее упорядочности известно под названием энтропии. В основе энтропии лежит энергетическое состояние созданного вещества. Физическое и смысловое понятие энтропии представлено Л.Больцманом в виде формулы

Таблица 2

Распределение массы золота в интенсивно метаморфизованных прожилково-вкрапленных рудах Нежданинского месторождения

Номер штольни; число проб; *n*, %; *mc*, м·г/т; *mc*, %	Класс содержаний золота											Сумма *mc*, м·г/т	Общая длина проб, м	Среднее содержание золота, г/т
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
Штольня 3														
Проб 265	3	8	34	50	87	68	6	2	6	1			259	
n, %	1,1	3	12,8	18,9	32,8	25,7	2,3	0,7	2,3	0,4				
mc, м·г/т	0,6	2,8	28,2	85,5	253,5	371,5	56,9	26,4	214,4	82,6		1122,4		4,33
mc, %	0,05	0,2	2,5	7,6	22,6	33,1	5,1	2,4	19,1	7,4				
Штольня 2														
Проб 616	13	47	68	125	182	138	25	15	1	1	1		550,5	
n, %	2,1	7,6	11	20,3	29,5	22,4	4,1	2,4	0,2	0,2	0,2			
mc, м·г/т	2,1	17,4	48,2	167,5	504,4	714,2	239,1	322,7	15,0	61,2	200,0	2291,8		4,16
mc, %	0,1	0,8	2,1	7,3	22,0	31,2	10,4	14,1	0,7	2,7	8,7			
Штольня 1														
Проб 710	27	77	140	163	163	88	21	15	11	2	3		653	
n, %	3,8	10,8	19,7	23	23	12,4	3	2,1	1,5	0,3	0,4			
mc, м·г/т	4,9	30,5	99,3	237,9	439,8	434,5	195,0	286,4	501,2	130,0	396,0	2755,5		4,22
mc, %	0,2	1,1	3,6	8,6	16,0	15,8	7,1	10,4	18,2	4,7	14,4			
Штольни 1, 2, 3														
Проб 1591	43	132	242	338	432	294	52	32	18	4	4		1462,5	
n, %	2,7	8,3	15,2	21,2	27,1	18,5	3,3	2	1,1	0,2	0,2			
mc, м·г/т	7,6	50,7	175,6	490,8	1197,8	1520,2	491,0	635,5	730,6	273,8	596,0	6169,6		4,22
mc, %	0,1	0,8	2,8	7,9	19,4	24,6	8,0	10,3	11,8	4,4	9,7			
Штольня 2 по всем типам руд														
Проб 1765	97	154	230	351	478	315	77	32	17	10	4		1561,9	
n, %	5,5	8,7	13	19,9	27,1	17,8	4,4	1,8	1	0,6	0,2			
mc, м·г/т	18,3	57,1	163,3	466,4	1289,8	1566,0	677,5	562,8	526,7	680,7	331,4	6340		4,06
mc, %	0,3	0,9	2,6	7,3	20,3	24,7	10,7	8,9	8,3	10,7	5,4			

$$S = k\ln W,$$

где k – постоянная Больцмана; W – вероятность состояния системы в соответствии со вторым началом термодинамики, выражаемое (в зависимости от теплоты и абсолютной температуры), числом эквивалентных конфигураций (микросостояний), которые может принимать система, состоящая из большого числа частиц, не меняя своего макросостояния.

Под макросостоянием системы в нашем случае понимается масса золота, у которого под действием меняющихся физико-химических условий рудообразования и внутрирудного метаморфизма преобразуется внутренняя структура путем перекристаллизации и перераспределений частиц золота.

По В.С.Урусову: «Когда несколько различных явлений природы накладываются друг на друга, образуя одну систему, дисимметрии их складываются таким образом, чтобы сохранить максимальное количество тех элементов симметрии и/или тех частей пространства, которые являются общими для каждого явления, взятого отдельно» [13, с.18]. Количественно сходство или похожесть изменившихся элементов энтропии может быть оценена как среднеквадратич-

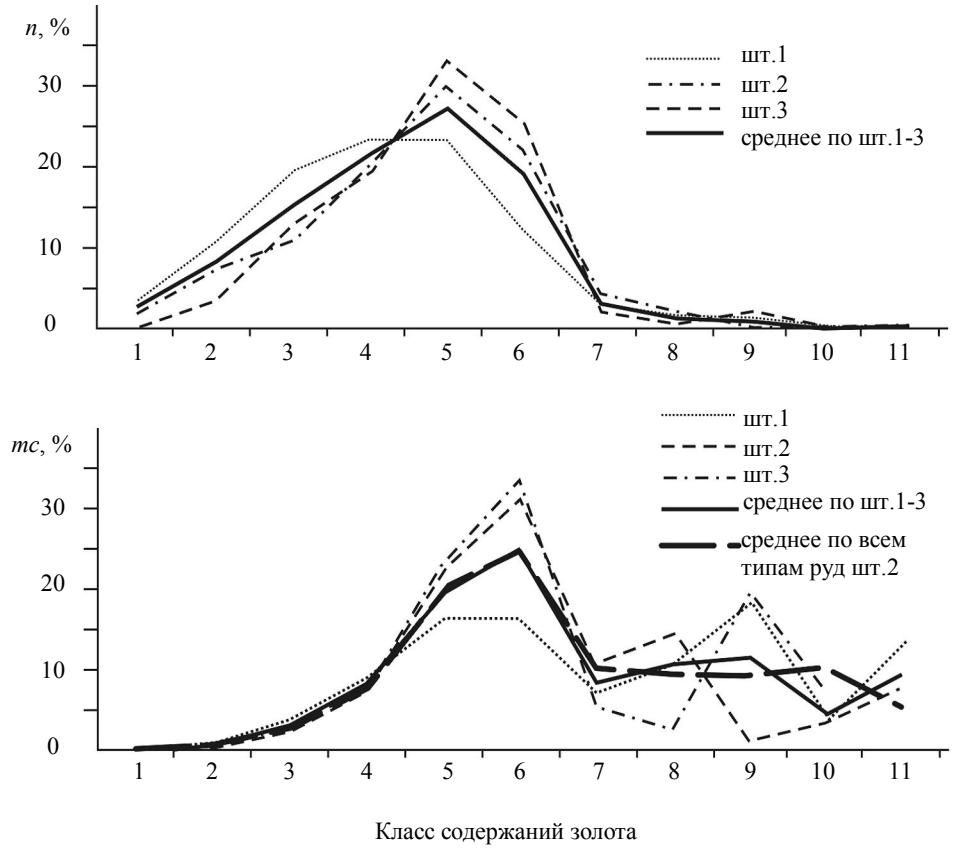


Рис.3. Распределение числа проб и массы золота в интенсивно-преобразованных прожилково-вкрапленных рудах Нежданинского месторождения

ные отклонения от первоначального состояния. В нашем случае среднеквадратичные отклонения от общей массы золота в руде представлены увеличением массы золота в дополнительно возникших классах концентраций (классы 7-10) после основного максимума шкалы.

Полученные значения массы золота в этих классах, строго говоря, не соответствуют полному равенству. Они приближаются к некому усредненному значению, соответствующему теоретическим представлениям. И это понятно, поскольку «соблюсти» идеально равные условия перераспределений золота в штольнях нереально. В каждом конкретном месте есть свои специфические особенности рудообразования, и идеализированные данные могут быть получены только в результате обобщения и нивелирования частных дисперсий за счет очень большого фактического материала.

Закономерность возникновения равномерного логнормального распределения массы золота в интенсивно дислоцированных и минерализованных рудах может быть проиллюстрирована и с других позиций. Известно, что гидротермальное рудообразование всегда сопряжено с дислоцированностью пород, в которых формируется руда. Эти дислокации могут быть сколового и отрывного типов, но обязательно образуются в обстановке сжатия и разрушения первичной породной системы. Анализ разрушения горных пород при их квазистатическом сжатии [6] на примере гранодиорита показал, что в интервале разрушенных частиц от 4 до 0,0625 мм на ситах Фишера – Вилера расчеты массы соответствующих отсеиваемых фракций в процентах, отстроенные в виде кумулятивных кривых, соответствуют логнормальному распределению. Эти же исследования на примере гранитов, песчаников и

сланцев показывают, что каждой породе свойственны свои расчетные фракции разрушенных частиц, но внутренние распределения этих фракций подчиняются логнормальному закону распределения. В этой связи уместно сослаться на работу В.А.Падукова [8], который для любой горной породы, подвергаемой механическому разрушению, использует главную характеристику – структурную энтропию, отражающую качественную и количественную стороны энергетики породообразования. Составные элементы структурной энтропии функционально связаны логнормальными зависимостями и поэтому однотипны. Сама же структурная энтропия, как и порода, дискретна. Следовательно, по типу структурных энтропий породы различны, что впервые позволило классифицировать их по энергоемкости разрушения.

В работе [15] приведено изучение разрушенного образца гнейса с точки зрения количественной оценки возникших обломочных частиц. Производилась съемка поверхности образца с помощью оптического и электронного микроскопов при увеличениях в 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800; 1600 раз. В каждом поле изучаемой поверхности с помощью специальных трафаретов подсчитывалось количество частиц. Все подсчеты группировались по четырем классам крупности. Результат подсчета таков: каждый класс крупности содержит частицы, средний размер которых в 2 раза меньше или больше предыдущего или последующего класса соответственно. Расчет плотностных характеристик частиц в каждом из классов свидетельствует об определенном подобии в изменении крупности частиц при переходе с одного масштабного уровня на другой.

Подводя итог некоторым теоретическим и экспериментальным данным, можно однозначно утверждать, что выявленные на Нежданинском месторождении равномерные логарифмически-нормальные распределения золота свидетельствуют об энтропийном законе распределения массы золота в связи с широко проявленным интрарудным преобразованием и метаморфизмом первичных прожилково-вкрапленных руд.

В изученных рудах мы столкнулись с перераспределением существенно дисперсного, тонкого и мелкого золота первичных руд. Важно было изучить и другие месторождения с более крупным и даже самородным золотом, в которых широко проявлены процессы внутрирудных преобразований, что должно проявиться в виде энтропийного закона распределения массы золота в этих рудах.

Изучение распределения массы золота в рудах месторождений типа минерализованных даек. В качестве объекта исследований взято Утинское золоторудное месторождение, расположенное среди песчано-сланцевых среднеюрских отложений верхоянского комплекса Инъяли-Дебинского мегасинклинория в бассейне р. Колымы.

Главным рудным телом месторождения является дайка № 7, сложенная альбитизированными, березитизированными и окварцованными андезитовыми порфиритами. Протяженность дайки около 14 км, из которых около 7 км приходится на собственно Утинское месторождение. Дайка приурочена к круто наклоненному крупному взбрососдвигу, по которому происходили многократные подвижки. В результате дайка интенсивно дислоцирована, местами будинирована, растащена или фрагментарно совмещена в плоскости нарушения. Мощность дайки варьирует от долей метра до 10 м. В пределах эксплуатируемой части дайки средняя мощность составила 1,1 м. Кроме того, дайка осложнена поперечными крутопадающими разрывами, образующими блоковое строение месторождения.

За период эксплуатации Утинское месторождение вскрыто подземными горными выработками на 12 горизонтах с общим вертикальным прослеживанием до 600 м. Среднее содержание золота на массу дайки низкое (1-2 г/т), но в отдельных участках дайки содержание золота составляет около 10 г/т, а в рудных столбах доходит до сотен граммов на тонну за счет присутствия в рудах крупного и даже самородного золота. Наличие такого золота подтверждается возникшей за счет разрушения дайки россыпью.



Рис.4. Распределение числа проб и массы золота в блоках 86-1,2 Утинского месторождения

Рудой месторождения является собственно минерализованная дайковая порода, в которой отмечаются маломощные сетчатые, лестничные и беспорядочно ориентированные кварцевые, кварц-альбит-карбонатные с серицитом и хлоритом прожилки и маломощные непротяженные жилы. Сульфидных минералов мало, особенно в кварцевых жилах. В минерализованной дайке присутствуют прожилковые и вкрапленные, местами гнездовые выделения пирита, пирротина, арсенопирита и очень небольшие концентрации галенита, сфалерита и сульфосолей.

По мнению составителей сводной работы по золоторудным месторождениям Северо-Востока России [5], формирование оруденения на Утинском месторождении осуществлялось в течение четырех последовательно сменяющихся стадий, из которых только одна, альбит-кварцевая с сульфидами, золотоносная. Следствием такого заключения является представление об основной структурной неоднородности дайки, в блоках которой в наибольшей степени реализована продуктивная минеральная ассоциация в виде рудных столбов, определяющих промышленную ценность руд.

По материалам разведочных и эксплуатационных работ в дайке № 7 было выделено более 200 эксплуатационных блоков, б□льшая часть из которых была отработана. В каждом блоке в период эксплуатации велось массовое опробование дайки на полную мощность. В зависимости от параметров блоков число проб в блоке варьировало от первой сотни до нескольких сотен. По этим данным особенности частотного и массового распределений проб золота для блоков с рядовой рудой выглядят следующим образом (рис.4). Частотное распределение характеризуется резко выраженным максимумом для 4-5-го классов содержаний золота и правосторонней асимметрией за счет дисперсии кривой распределения в 11-15-м классах. Правосторонняя ветвь кривой нарушается возвышающимися усложнениями в классах 6-9 и 11-15. Такая дисперсия частотного распределения свидетельствует о невозможности формирования оруденения в одну стадию.

Максимуму частотного распределения соответствуют первичные березитизированные и окварцованные руды дайки. Золото в них тонкое и мелкое, что подтверждается тем, что в первые годы эксплуатации месторождения складировались в отвал березиты, из окисленных сульфидов которых позднее извлекли более 200 кг мелкого золота.

Последующие усложнения кривой частотного распределения в 6-9-м классах связаны с проявлением выделяемой продуктивной золотоальбит-кварц-сульфидной стадией, а в 11-15-м классах – с проявлением крупного и самородного золота. Масштабы

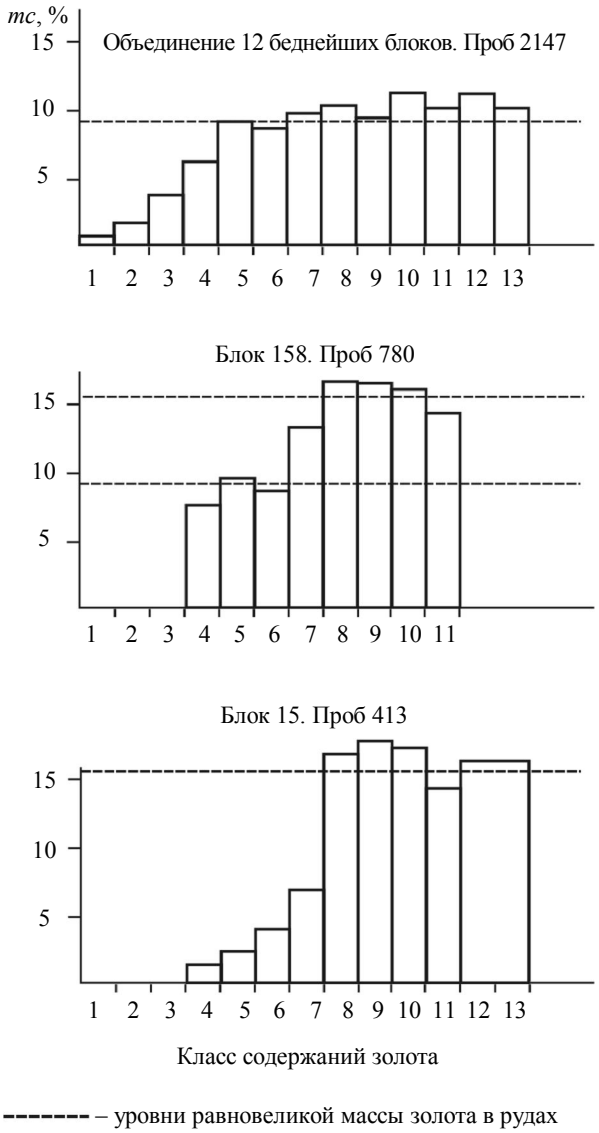


Рис.5. Распределение массы золота в беднейших, рядовых и богатых рудах Утинского месторождения

соотношений распределений массы золота в блоках могут выглядеть по-разному, но общая картина этих трех составных элементов минерализованной дайки неизменна.

Чтобы оценить возможность связи всех трех типов руд дайки, нами были проанализированы разнотипные по характеру золотоносности блоки с бедной, обычной промышленной и аномально богатой рудой. В каждом из взятых типов была определена масса золота, приходящаяся на классы содержаний по логарифмически-нормальной шкале (рис.5).

Для наиболее бедных руд были взяты 12 блоков с общим количеством проб 2147. Распределение массы золота растянуто по всей шкале классов, что свидетельствует о неоднородности рудообразующей среды и равномерном логарифмически-нормальном распределении. Такое явление можно объяснить только тем, что первичные руды подверглись интенсивному преобразованию. Это создало дисперсию распределения, разброс значений по шкале, а сама масса золота распределена по энтропийной закономерности, близкой 8-10 %.

В блоке 158 с рядовой рудой и общим количеством проб 780 обнаруживается двухуровневый тип распределения массы золота. Первый уровень охватывает 4-6-й классы, полностью соответствует распределению в бедных рудах и представляет собой как бы «реликт первичных руд». Второй уровень прослеживается в 7-11-х классах и имеет тенденцию равномерного распределения 14-17 %. В классах 1-3 золото полностью отсутствует.

В наиболее богатых рудах (блок 15, проб 413) доли массы золота примерно равномерно распределены с 8-го по 13-й классы шкалы и составляют 14-17 %. По сравнению с бедными и рядовыми рудами в богатых уменьшается доля массы золота в классах 4-7.

Приведенный пример показывает, что всем типам руд свойственно равномерное логарифмически-нормальное распределение массы золота в соответствии с энтропийной закономерностью. Из этого следует, что формирование Утинского месторождения представляет сложный, эволюционно направленный процесс становления оруденения, в котором образование как бедных, так и богатых руд взаимосвязано и взаимообусловлено. Энтропийная закономерность распределения массы золота свидетельствует, что богатые руды образовались из первичных бедных руд как своеобразной промежуточной формы нахождения золота. В этой связи поиски промышленно богатых руд в минерализованных дайках необходимо прежде всего направлять на выявление интенсивно березитизированных и в последующем интенсивно метаморфизованных (окварцо-

ванных, серицитизированных, хлоритизированных и сульфидизированных) даек.

Нужно согласиться с А.А.Сидоровым [3] в том, что многие мелкие жильные месторождения золота являются следствием преобразования и переотложения золота из первичных базовых бедных вкрапленных и прожилково-вкрапленных рудных образований. Подтверждением этого будет обнаружение энтропийного распределения массы золота в рудах.

Россыпные аллювиальные месторождения представляют наиболее крупную фракцию золота коренных месторождений. Гранулярное распределение золота в россыпях определяется типом коренных источников. Так, для различных структурных зон Яно-Колымского золотоносного пояса характерна своя специфика распределения золота по крупности, морфологии зерен вне зависимости от порядка речных долин [2]. Коренной источник создает распределение массы крупных зерен золота в россыпи. В этой связи весьма примечательна информация в работе Н.А.Шило [14], в которой приводятся данные о гранулярном составе золота россыпей Яно-Колымского пояса. Массовые доли золота распределяются по фракциям следующим образом:

Фракция, мм	*M*, %
< 0,25	20,4
0,25-0,5	20,2
0,5-1,0	19,7
1-2	11,3
2-4	8,9
4-8	6,5
8-16	4,7
> 16	8,3

Из приведенной информации видно, что 60,3 % валового золота россыпей Яно-Колымского пояса подчиняется закономерностям энтропийного распределения массы. Это значит, что подобное явление не может быть объяснено с позиции связи золотого коренного оруденения с каким-то конкретным интрузивным проявлением. Вероятнее всего, базовой основой для становления и формирования коренных и, как следствие, россыпных месторождений является структурно-металлогеническая специфика геологического развития региона и его стратифицированных комплексов пород, несущих первичное тонкое золото, в последующем мобилизованное многофазной интрузивной и метаморфогенной деятельностью как полихронным процессом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абдулин А.А.* Наноминералогия золота золоторудных месторождений основных промышленных типов / А.А.Абдулин, В.Н.Матвиенко, В.А.Нарсеева // Отечественная геология. 2000. № 3. С.20-40.

2. Геология россыпных месторождений золота Северо-Востока СССР / Под ред. О.Х.Цопанова; Северо-Вост. террит. геолог. управление. Магадан, 1979. 200 с.

3. Золоторудные гиганты России и мира / М.М.Константинов, Е.М.Некрасов, А.А.Сидоров, С.Ф.Стружков. М.: Научный мир, 2000. 272 с.

4. *Канцель А.В.* Функция распределения металла в рудах как генетическая характеристика процесса рудообразования // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1988. № 10. С.18-30.

5. Многофакторные прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России / Под ред. М.М.Константинова, И.С.Розенблюма, М.З.Зиннатуллина; Комитет по геологии и использованию недр РФ, Северо-Восточный геологический комитет. М., Магадан. 1992. 140 с.

6. Наночастицы в процессе разрушения и вскрытия геоматериалов / В.А.Чантурия, К.Н.Трубецкой, С.Д.Викторов, И.Ж.Бунин / ИПКОН РАН. М., 2006. 216 с.

7. Нежданинское рудное поле / В.М.Яновский, Н.П.Касаткина, А.А.Скобелев, Б.В.Рогачев // Геология золоторудных месторождений Востока СССР / ЦНИГРИ. М., 1988. С.7-27.

8. *Падуков В.А.* Энтропийный закон разрушения горных пород // Зап. Горного института. 2007. Т.168. С.48-50.

9. Полиформационное золоторудное месторождение / Г.Н.Гамянин, М.К.Силичев, Н.А.Горячев, Н.А.Белозерцева // Геология рудных месторождений. 1985. № 5. С.86-89.

10. *Сендек С.В.* Структура запасов металла как следствие генетических особенностей рудообразования // Зап. Санкт-Петербург. горного ин-та. 1993. Т.137. С.28-38.

11. *Сендек С.В.* Характерные особенности Нежданинского золоторудного месторождения как представителя крупных золотопроявлений типа минерализованных зон / С.В.Сендек, С.М.Сычев // Уникальные месторождения полезных ископаемых России. Закономерности формирования и размещения / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 1996. С.30-38.

12. *Силичев М.К.* Геологическое положение и особенности структуры Нежданинского золоторудного месторождения // Геология рудных месторождений. 1970. № 2. С.96-102.

13. *Урусов В.С.* Эволюция Земли и Космоса в свете концепции симметрии-дисимметрии // Смирновский сборник 2007. М.: Изд-во МГУ, 2007. 338 с.

14. *Шило Н.А.* Учение о россыпях. М.: Изд-во Академии горных наук, 2000. 632 с.

15. *Santarelli F.J.* Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests / F.J.Santarelli, E.T.Brown // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1989. V.124. № 5. P.401-413.

REFERENCES

1. *Abdulin A.A.* Nanomineralogy of gold in the main types of gold ore deposits / A.A.Abdulin, V.N.Matvienko, V.A.Narseeva // Fatherland geology, 2000. № 3, pp.20-40.

2. Geology of placer gold deposits of North-East of the USSR / Chief editor O.Kh.Tzopanov. Magadan: SVTGU, 1979. 200 p.

3. Giant gold ore deposits in Russia and the World / M.M.Konstantinov, E.M.Nekrasov, A.A.Sidorov, S.F.Struzhkov. Moscow: Nauchny Mir, 2000. 272 p.

4. *Kantsel A.V.* Function of a metal distribution in ores as a genetic characteristic of the ore-forming process // Journal of the RASc. Ser. Geol., 1988. № 10, pp.18-30.

5. Multiple-factors forecasting-prospecting models of gold and silver ore deposits of North-East of the USSR / M.M.Konstantinov, I.S.Rozenblyum, M.Z.Zinnatullin. Magadan: Committee on Geology and subsurface using, 1992. 140 p.

6. Nanoparticles in the process of destruction and uncovering of geological materials. / V.A.Chanturia, K.N.Trubetskoy, S.D.Viktorov, I.Zh.Bunin / IPKON RASc. Moscow, 2006. 216 p.

7. Nezhdaninskoye gold ore field / V.M.Yanovsky, N.P.Kasatkina, A.A.Skobelev, B.V.Rogachev // Geology of gold ore deposits in the East USSR / TsNIGRI. Moscow, 1988, pp.7-27.

8. *Padukov V.A.* Entropy rule in destruction of mining rocks // Proceedings of the Mining Institute, 2007. Vol.168, pp.48-50.

9. Polyformational gold ore deposit / G.N.Gamyanin, M.K.Silichev, N.A.Goryachev, N.A.Belozertseva // Geology of ore deposits. 1985. № 5, pp.86-89.

10. *Sendek S.V.* Structure of the metal reserves as a consequence of the ore-forming genetic peculiarities // Proceedings of the Saint-Petersburg Mining Institute. 1993. Vol.137, pp.28-38.

11. *Sendek S.V.* Characteristic peculiarities of Nezhdaninskoye gold ore deposit as a represenative of the large scale gold occurrence of the mineralized zones type / S.V.Sendek, S.M.Sychev // Super-large ore deposits of Russia, regularities of formation and location / SPMI. Saint-Petersburg, 1996, pp.30-38.

12. *Silichev M.K.* Geological site and peculiarities of structure of Nezhdaninskoye gold ore deposit // Geology of ore deposits. 1970. № 2, pp.96-102.

13. *Urusov V.S.* Evolution of Earth and the Universe under view of the symmetry-dissymmetry concept // V.I.Smirnov's symposium 2007 / MGU. Moscow, 2007. 338 p.

14. *Shilo N.A.* Doctrine on placers / Ed. of the RASc. Moscow, 2000. 632 p.

15. *Santarelli F.J.* Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests / F.J.Santarelli, E.T.Brown // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1989. Vol.124. № 5, pp.401-413.