ISSN 0135-3500. Зап.Санкт-Петербургского горного ин-та. 1993. Том 137

УДК 553.3/4+553.41:

С.В.СЕНДЕК

СТРУКТУРЫ ЗАПАСОВ МЕТАЛЛА КАК СЛЕДСТВИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РУДООБРАЗОВАНИЯ

Показана генетическая информативность структур запасов металла золотосодержащих руд, подвергшихся гипраминерализационным метаморфическим преобразованиям. По характеру изменений структур запасов можно судить о качественной и количественной особенностях рудообразующего процесса.

Вопрос использования структур запасов золота в рудах месторождений с целью прогноза и оценки рудных столбов возник еще в конце 60-х годов. Острая необходимость надежного предвидения характера и типов рудных столбов, особенно на стадиях поисков и разведки месторождений, всегда представляла основополагающую задачу геолого-экономической оценки любого золоторудного объекта, будь то коренное или россыпное месторождение.

История поисков закономерностей распределения золота в рудах разнотипных месторождений своими корнями уходит в глубокую древность. Современные методы прогнозирования характера и типа промышленного оруденения развиваются в двух основных направлениях:

структурно-вещественном, раскрывающем закономерности формирования и пространственного размещения руд в зависимости от природы и последовательности развития рудовмещающих структур, стадийности и этапности минералообразующих процессов, зональности, типов руд, продуктивности на золото минеральных парагенезисов и их объемного распределения, эрозионной вскрытости оруденения и ряда других геологических признаков;

математико-статистическом, раскрывающем закономерности концентрации золота в рудах на основе анализа их вероятностного распределения.

Первое, структурно-вещественное, направление в большей мере оценивает качественные признаки оруденения от металлогенических провинций до отдельных месторождений: формационный тип, структура рудных полей, морфологические особенности рудных тел, вертикальная и горизонтальная зональности, природные и технологические сорта и типы руд, химические и минеральные формы нахождения золота в рудах, возможные типы рудных столбов и их пространственное распределение. Второе, математико-статистическое, в большей степени ориентировано на распознавание количественной стороны промышленного оруденения: повышение точности и надежности выявленных в процессе геолого-поисковых и разведочных работ промышленных запасов руды и золота.

Бесспорно, что наиболее надежный прогноз и геолого-экономическая оценка могут быть выполнены в том случае, когда оба названных направления взаимно дополняют друг друга, поскольку структурно-вещественный подход к прогнозу не обеспечивает высокую точность, а математико-статистические методы не всегда учитывают пространственную геологическую изменчивость оруденения. Математические методы нередко «заформализованы" при решении общих геологических закономерностей, и их практическое применение сплошь и рядом сводится к решению часто разведочных задач (достоверность опробования, расчет плотности поисково-разведочных сетей, подсчет запасов и др.). Тем не менее широкое использование ЭВМ и приближение математического анализа к геологической природе оруденения позволяет рассматривать это направление как наиболее перспективное в раскрытии закономерностей распределения руды и золота в рудных телах месторождений, рудных полей и даже крупных металлогенических провинциях с созданием соответствующих моделей этих закономерностей.

Основополагающей мерой при раскрытии и анализе закономерностей распределения полезного ископаемого в рудном теле, в нашем случае золота, является его концентрация в руде - геохимическая величина, известная под названием «содержание". Именно содержание металла характеризует степень богатства руд, дает возможность типизировать месторождения, рудные тела, отдельны 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 это было показано А.В.Канцелем [2], функциональная аппроксимация этих величин дает возможность получить ряд кривых распределения, отражающих скорость процесса рудообразования и термодинамическую функцию его состояния.

Вместе с тем при анализе закономерностей формирования и распределения рудных столбов в различных золоторудных месторождениях Северо-Востока России нам пришлось столкнуться с тем, что использовать весьма представительный материал опробования рудных тел, полученный в процессе разведки и эксплуатации ряда месторождений, для математико-статистической обработки содержаний нельзя. А имеющиеся многочисленные построения на этот счет, как бы отображающие закономерности пространственного размещения богатых руд и, следовательно, рудных столбов, по большей части выдают желаемое за действительное и, к сожалению, являются основанием для всякого рода спекулятивных рассуждений.

Прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что при генерализации какой-либо выборки по анализу содержаний золота в рудах в статистическую обработку включаются практически все пробы разведочных и эксплуатационных выработок по принципу: «чем больше, тем лучше". При этом не принимается в расчет, что пробы характеризуют совершенно различные по условиям формирования минеральные парагенезисы, типы руд и что анализ такого распределения содержаний весьма напоминает представление о среднестатистической температуре больных по госпиталю. Более того, нарушаются элементарные требования сравнимости и сопоставимости результатов, поскольку в вы-

борку включаются содержания золота в руде, соответствующие разнообъемным (преимущественно бороздовым) пробам, распределенным бессистемно и относящимся где к фрагменту, а где к целому сечению рудного тела.

Наконец, последнее. Даже в том случае, когда методика опробования рудных тел соблюдается и генерализация выборок для статистической обработки выполнена правильно, полученные результаты в виде вероятностной кривой распределения концентраций, как и сама среднестатистическая величина содержаний золота в анализируемой руде, оказываются сходными или аналогичными для различных по генезису типов руд. С такой ситуацией нам пришлось столкнуться на Нежданинском золоторудном месторождении при определении уровней золотоносности различных типов руд, о чем будет сказано ниже. Следовательно, концентрация золота в руде, хотя и является важной геохимической характеристикой оруденения, но при анализе закономерностей распределения золота в рудах месторождения не может быть универсальной.

Вот почему с целью прогноза и оценки рудных столбов нам пришлось прибегнуть к анализу массы золота, заключенной в рудных телах. На протяжении более четверти века мы изучали закономерности количественных соотношений масс золота, приходящиеся на рядовые руды и рудные столбы в различных рудных телах разнотипных по генезису месторождений. В качестве инструмента этого анализа нами использована структурно-вещественная и статистическая закономерности распределения продуктивностей оруденения в объеме или конкретных сечениях рудных тел.

Напомним, что под продуктивностью оруденения понимается количество металла, заключенного в рудном теле, отнесенного к единице поверхности этого тела. В качестве составных элементов этой величины выступают хорошо известные понятия: линейный запас – для крутопадающих рудных тел и вертикальный запас – для пологих рудных тел. И хотя линейные и вертикальные запасы также являются величинами относительными, с их помощью можно распознать геологическое объемное и статистическое распределения общего запаса металла на основе модели структуры запаса. По сравнению с содержанием линейный или вертикальный запасы в большей степени соответствуют геологической природе изучаемого объекта, поскольку высокие концентрации золота в прожилке вовсе не обеспечат большого количества золота по сравнению с рудами среднего уровня концентраций, слагающими мощные минерализованные зоны. Опыт типизации рудных столбов на этой основе применительно к золоторудным месторождениям различных формаций Северо-Востока был предпринят нами ранее [6].

Математическое понимание структуры запасов применительно к россыпным месторождениям золота впервые было предложено К.В.Кистеровым [3]. Под структурой запасов им понимаются вероятностные соотношения элементов младшего системного ранга в элементе старшего системного ранга. Выбор системного ранга определяется задачей исследования. Этот выбор может быть очень широким: от анализа структуры запаса в каком-либо эксплуатационном блоке рудного тела, для которого младшим системным элементом являются данные эксплуатационного опробования, до крупной металлогенической про-

винции, где элементами младшего системного ранга могут быть отдельные месторождения или рудные узлы и т.д. Кроме того, исследование структуры запасов предполагает анализировать дисперсию распределения запасов младшего ранга в изучаемом объеме, что дает возможность сравнивать и сопоставлять полученные результаты для различных объектов исследований.

Предложенная математико-статистическая методика исследования структур запасов с успехом была использована нами для решения ряда прикладных вопросов методики разведки и оценки запасов ряда золоторудных месторождений Магаданской области.

Остановимся на рассмотрении типовых структур запасов в зависимости от характера рудообразования. Анализ типовых структур, по нашему мнению, позволяет решать и обратные задачи исследований: по выявленным структурам запасов на основе типовых структур раскрывать недостающие сведения по генезису оруденения, что позволяет, в конечном счете, определять закономерности формирования промышленного оруденения и его пространственного распределения.

В качестве объектов исследования нами взяты Нежданинское и Нателкинское золоторудные месторождения Восточной Якутии и Магаданской области. Оба месторождения хорошо вскрыты по вертикали на многие сотни метров, имеется обширный материал геолого-разведочных и эксплуатационных работ. Месторождения принадлежат единому структурно-морфологическому типу минерализованных зон дробления и смятия терригенных пород и относятся к золото-сульфидно-кварцевой формации.

Развитие оруденения на этих месторождениях проходило сложно и длительно. Как это было показано нами [4] и М.К.Силичевым [8] для Нежданинского месторождения, промышленное оруденение формировалось многостадийно, в два крупных временных этапа, каждый из которых характеризовался особенностями структурно-тектонической обстановки и эволюции становления рудной минерализации. Позднее Г.Н.Гамянин [1] рассматривал эти месторождения как полиформационные.

Главная специфика рудообразования заключается в исключительно сильно проявленных интраминерализационных преобразованиях ранних парагенезисов минералов в результате воздействия на них более поздних по времени гидротермальных растворов, что привело к появлению не просто телескопированных, совмещенных парагенезисов, а своеобразных внутрирудных метаморфогенных минеральных сообществ, которым свойственно корродирование, растворение, переотложение и перекристаллизация рудных минералов и золота, заключенного в этих рудах [7]. И хотя такая генетическая обстановка рудообразования вызывает естественные сложности в познании закономерностей формирования промышленного оруденения, но при очень внимательном и дотошном изучении этих сложных процессов появляются исключительные возможности раскрытия количественных преобразований рудного вещества и золота.

Методика анализа структуры запасов в нашем случае заключалась в следующем:

геологическом оконтуривании изучаемого рудного тела или его составляющего фрагмента в пределах представительного штольневого сечения или в контурах эксплуатационных блоков;

относительно равномерном опробовании рудного тела на полную мощность и получении значений линейных запасов золота в метрограммах на тонну;

определении суммарных количеств проб и линейных запасов, по отношению к которым рассчитываются число проб и линейные запасы, приходящиеся на каждый класс двоичной шкалы;

построении гистограмм или графических кривых распределения числа проб n и массы золота M, т.е. кривых частотного и массового распределения.

Анализ структур запасов целесообразно рассматривать на примере простого случая и далее переходить к более сложным геологическим ситуациям.

На Немданинском месторождении главное рудное тело - рудная зона № I представляет собою крутонаклоненную на запад плитообразную залежь в зоне долгоживущего разлома. Вмещающие породы - аргиллитоалевролитовый комплекс с прослоями песчаников пермского возраста. Для этих осадочных пород характерно присутствие тонкого пелитоморфного углеродистого вещества, придающего аргиллитовым разностям темный, почти черный цвет. Рудное тело довольно хорошо выдержано как по простиранию, так и по падению, хотя в верхней части наблюдается ветвление рудной зоны. Она начинает как бы распадаться на несколько составляющих, хотя главная рудовмещающая структура прослеживается весьма отчетливо.

Внутреннее строение рудной зоны сложное. Здесь присутствуют в разной степени дислоцированные и гидротермально измененные породы, среди которых отмечаются линзо- и жилообразные кварцевые тела.

Главным составным элементом рудной зоны являются гидротермально измененные дислоцированные породы, представленные типичными прожилково-вкрапленными рудами. Они создают геологическую основу промышленного рудного тела, по ним практически проводится оконтуривание рудной зоны.

Генетически прожилково-вкрапленные руды формировались на первых, начальных стадиях промышленного оруденения. Их становление сопровождалось неоднократным рассланцеванием, брекчированием пород. Появлялись минеральные новообразования в виде тонкого метасоматического и сетчато-прожилкового кварца, с которым часто ассоциируют альбит, карбонаты, серицит, гранулярные стяжения углеродистого вещества (шунгит ?), хлорит. Главной достопримечательностью этих измененных пород являются сульфиды - пирит и арсенопирит, которые в виде тонких (доли миллиметра) зерен определены в массе пород. Именно с этими сульфидами и связывается золотоносность прожилково-вкрапленных руд, поскольку, по данным технологического опробования руд, в сульфидных концентратах содержание золота составляет от десятков до сотен граммов на тонну. Однако количество сульфидов в массе пород не превышает первых процентов и лишь в единичных случаях может приближаться к 10 %, поэтому общее содержание золота низкое.

Изучение этих руд в вертикальном разрезе рудной зоны обнаруживает разнообразие степени их окварцованности, вариации количественных соотношений сульфидов и другие структурно-вещественные отличия. Причем с глубиной различия становятся наиболее контрастными.

Детальное изучение всех разновидностей прожилково-вкрапленных руд привело нас к однозначному выводу, что наиболее контрастные отличия в составе и текстурно-структурных признаках руд сопряжены с явлениями внутрирудного, интраминерализационного метаморфизма первичных прожилково-вкрапленных образований. Особенно наглядно это просматривается в контактных зонах прожилково-вкрапленных руд с более поздними кварцево-жильными телами или когда первичные руды были повторно брекчированы или рассланцованы и залечены более поздними кварцевыми и кварц-карбонат-серицит-пелитовыми продуктами.

Тем не менее, степень золотоносности всех этих руд оказалась весьма стабильна: средние содержания золота для прожилково-вкрапленных руд от верхнего до нижнего штольневого горизонта максимально отличаются на несколько десятых грамма на тонну, а для двух верхних штольневых горизонтов – на 0,03 г/т. Это дало основание сделать два важных вывода:

степень золотоносности (концентрация) прожилково-вкрапленных руд является типоморфным признаком, обусловленным генетической спецификой рудообразования;

в процессе интраминерализационных преобразований этих руд не происходит существенной миграции золота.

Характерный и устойчивый уровень золотоносности подтверждается стабильностью вероятностного распределения проб n на всех штольневых горизонтах, совпали медианные значения кривых распределения, сами кривые имеют близкий к логнормальному вид с незначительной асимметрией. Единственное, что обращает на себя внимание, это направленное снижение максимума распределения от верхних уровней рудной зоны к нижним на 10-12 % и возрастание дисперсий в анализируемом распределении (рис.1).

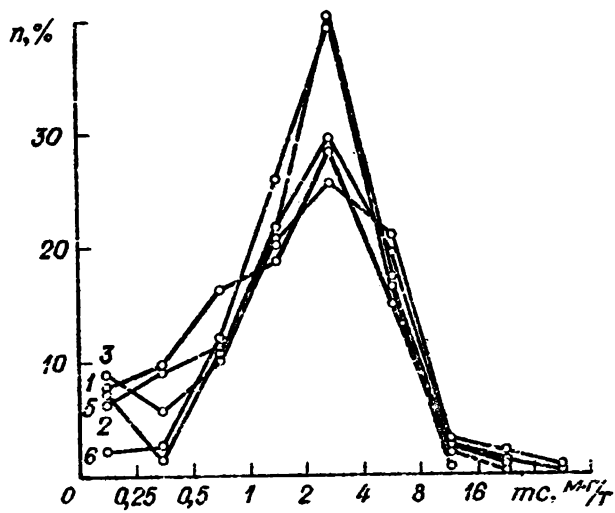


Рис.1. Совмещенный график частотного распределения проб продуктивности по штольневым горизонтам Неждаинского золоторудного месторождения для прожилково-вкрапленных руд. Количество проб по горизонтам: 1 – 537; 2 – 427; 3 – 428; 5 – 417; 6 – 264

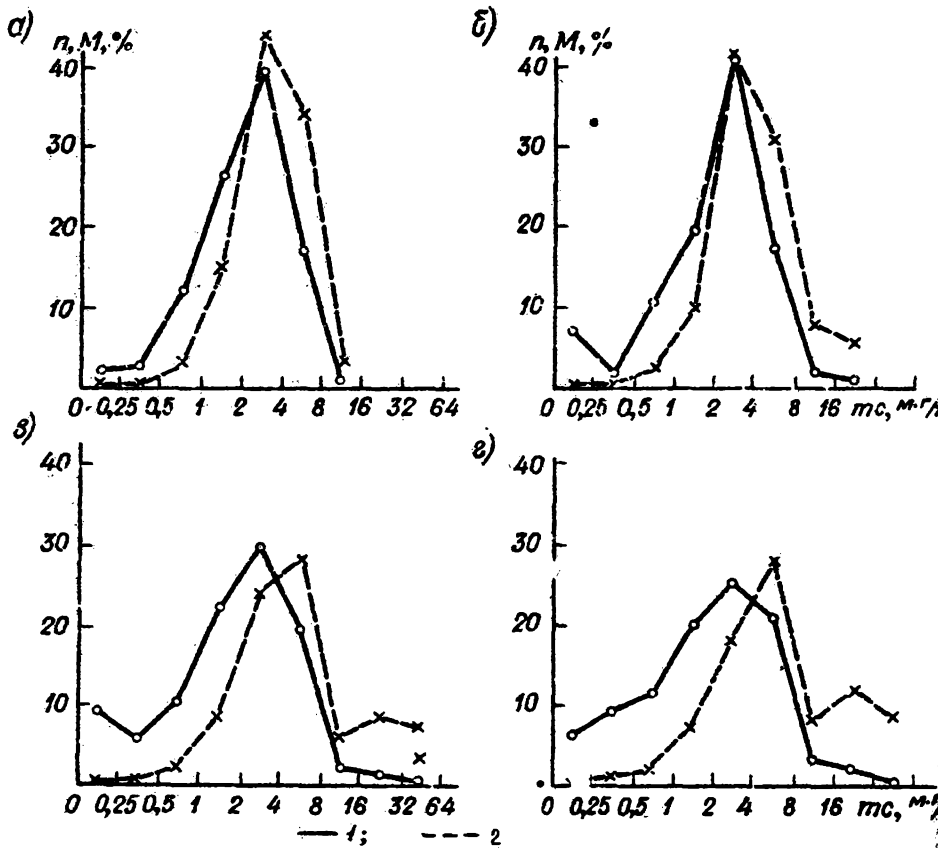


Рис.2. Совмещенные графики частотного (1) и массового (2) распределения по штольневым горизонтам УI (а), У (б), III (в) и II (г)

Иная картина наблюдается при анализе массового распределения золота. На верхнем штольневом горизонте (штольня УI) отстроенная кривая M в це лом сходна с кривой частотного распределения n, максимумы их совпадают и отличия заключаются в лево- и правосторонней асимметрии (рис.2,а). Ге логическая трактовка такого положения понятна: вся масса заключенного в руде золота находится в сульфидах. Причем золото здесь настолько тонкое, что проведенное выборочное электронное сканирование пиритов и арсенопиритов в аншлифах не обнаруживает аномальных участков на сечении минералов в виде золотин. Проведенный нами анализ соотношений массовых концентраций сульфидов в руде с концентрацией золота в пробе по данным 20 протолочек обнаружил высокую сходимость.

На следующем штольневом горизонте (штольня У) структура запасов принципиально сходная. Отличия заключаются в том, что примерно на 5 % с жается количество золота в классе максимума его распределения, но зато

является еще один класс с более высокими значениями по шкале. Возрастает число проб с низкими массовыми значениями золота (рис.2,б). Геологическая обстановка на этом горизонте сохраняется, хотя в ряде мест рудной зоны, где фиксировались наиболее высокие из встречавшихся концентраций золота, по данным бороздового спробования геолого-разведочных выработок, отмечались признаки метаморфических преобразований ранних минералов, в том числе и сульфидов. Это выражалось в деформации минералов, появлении псевдожилок метасоматического кварца, исчезновении мелких кристаллов арсенопирита и пирита и, наоборот, появлении довольно крупных, до 2 мм в поперечнике, зерен этих минералов. По данным протолочек, отобранных нами из этих мест, наблюдается направленное снижение массовых концентраций сульфидов в сравнении с малоизмененными рудами.

Еще на 200 м ниже (штольня III) характер прожилково-вкрапленных руд в рудном теле видоизменяется значительно, появляются протяженные по простиранию зоны метасоматического окварцевания, развивающиеся по участкам брекчирования и рассланцевания первичных руд. Такая видоизмененная руда напоминает серого цвета роговик, в котором отчетливо просматриваются теневые текстурные рисунки видоизмененных обломков оруденелых пород. Общая масса сульфидов в таких породах снижается и довольно существенно, по сравнению с аналогичными пробами верхних штольневых горизонтов.

Структура запасов на этом участке вертикального среза рудного тела выглядит иначе, нежели рассмотренные ранее случаи. Прежде всего, максимум массового распределения по сравнению со штольней VI сократился почти на 15 % и сместился на один класс вправо. В двух классах с более высокими значениями *mc* зафиксировано золото. Возросло количество «пустых» проб (рис.2,в).

Микроскопическое изучение этих руд обнаруживает собирательную перекристаллизацию рудообразующих минералов, появление своеобразных порфиробласт мозаичного кварца с пелитовыми каймами углеродистого вещества, метакристаллов пирита с включениями реликтовых минералов. Хорошо видны коррозионные структуры разложения игольчатых арсенопиритов вплоть до их полного уничтожения и появления дипирамидальных кристаллов с ромбовидными сечениями зерен. Именно в таких рудах под микроскопом можно обнаружить мельчайшие выделения золота на концевых гранях зерен арсенопирита, реже пирита, иногда пылевидные золотые включения можно наблюдать в кварц-серицитовой массе.

На более низком 200-метровом интервале вертикального среза рудного тела (штольни II и I) характер прожилково-вкрапленных руд и их преобразований сохраняется, что подтверждается аналогичным графиком структуры запасов (рис.2,г).

Наконец, в штреке I/3 (штольня III), пройденном по рудному телу для зазерки сплошно ли его по простиранию в пределах штольневого горизонта, нами детально была опробована и изучена наиболее преобразованная зона прожилково-вкрапленных руд. Всего было проанализировано 40 сечений на полную мощность и по ним определено частотное и массовое распределение (рис.3).



Рис.3. Совмещенные графики частотного (1) и массового (2) распределения извлеченных руд в штреке 1/3

Установлено, что графики частотного распределения для всех штольневых горизонтов и штрека I/3 одинаковы. В пределах малых значений шкалы продуктивности структуры запасов штольневого горизонта К (см.рис.2,в) и штрека I/3 (рис.3) полностью совпадают. Однако, достигнув определенного максимума, значения M на рис.3 держатся на одном и том же уровне. Нами такой тип распределения массы золота был назван закономерным [5]. Причины существования такого графика требуют особого исследования. Важно отметить другое, чисто геологическое наблюдение, которое обусловило создание полученной структуры запасов.

Анализы всех сечений зоны были продублированы пробами протолочек, с конечным получением отмытых в лотке тяжелых фракций, основную массу которых составляли сульфиды. Кроме сульфидов встречались гематит, магнетит, ильменит, вульфенит и единичные знаки золота. В двух случаях в них присутствовали значительное количество галенита, сфалерита, блеклых руд. Отобранные монофракции сульфидов размером зерен +0,5 мм анализировали на содержание в них золота спектрозолометрическим методом, из фракций -0,5 мм были изготовлены искусственные аншлифы для анализа под электронным микроскопом.

Все эти исследования показали очень невысокую концентрацию золота в пиритах и арсенопиритах, которая почти на порядок ниже концентраций золота в сульфидах из протолочек, взятых из верхних штольневых горизонтов прожилково-вкрапленных руд. Микрозондирование ряда аншлифов показало неоднородность поверхности арсенопиритов, особенно на границах соседствующих зерен или вдоль трещин, где отмечается повышенный фон золота или просматриваются мельчайшие выделения золота.

Попытка изучить соотношения золотоносности проб в зависимости от массовых соотношений минералов тяжелых фракций, где превалируют сульфиды, показала, что при малых значениях продуктивности сохраняется положительная корреляция, но для класса 2-4 и более она отсутствует. Если учесть, что общее количество сульфидов в изучаемых рудах в несколько раз меньше, чем в обычных, то становится понятным своеобразие данной структуры запасов.

В данном рудном теле только около 40 % массового золота связано с сульфидными минералами, о чем свидетельствует левая возрастающая ветвь кривой, которая весьма сходна с кривой структуры запасов всего штольневого горизонта (см. рис.2,в). Остальная часть золота высвобождена из суль-

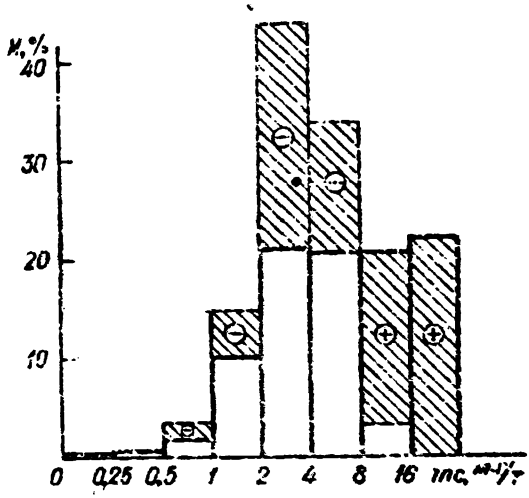


Рис.4. Совмещенные гистограммы массового распределения золота штольня VI (пунктирная линия) и штрека 1/3 (сплошная линия). Заштрихованные полигоны – массы золота, высвобожденного из сульфидов (–) и свободного (+)

филов и находится в свободном состоянии (рис.4). Правая горизонтальная часть детак характеризует структуру запаса, сформированную в процессе интрарудного метаморфизма первичных руд за счет перегруппировки золота.

Выводы

1. Приложение математико-статистических методов к решению генетических проблем рудообразования может быть весьма эффективным. Примером может служить изучение структур запасов металла в рудах на основе их вероятностного распределения.

2. Для эпитоторудных месторождений можно констатировать, что нормальный или логнормальный тип частотного распределения проб n является устойчивым индикатором проявления рудной минерализации определенного типа, зависимого от генетической сути оруденения. Даже после существенных метаморфизических преобразований первичных руд видоизменяется тип частотного распределения сохраняется.

3. Структура запасов золота, или характер массового распределения металла M в пределах используемой шкалы, – это очень «чуткий» математический инструмент, который не просто отражает количественные соотношения масс золота, но и выявляет формы нахождения золота в руде и тем самым способствует расшифровке сложных генетических проблем рудообразования на количественной основе.

4. Использование структур запасов на других месторождениях Северо-Востока России показало их высокую научную и практическую результативность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гамянин Г.Н. Полиформационное оруденение Верхояно-Колымских мезозоид // Металлогения и рудн. формация зоны перехода континент – океан / АН СССР. ДВО-Сев.-Вост.комплекс. НИИ. Магадан, 1990. С.55–61.

2. Качемель А.В. Функция распределения металла в рудах как генетическая характеристика процесса рудообразования // Изв. АН СССР. Сер.геол. 1966. № 10. С. 18–30.

3. Кистеров К.В. О структуре запасов россыпного золота // Мат. по геол. и полезн. ископ. СВ СССР. Магадан: Магаданск. кн.из-во. 1982. Вып. 26. С. 248–250.

4. Особенности методики разведки, оценки и подсчета запасов одного золоторудного месторождения типа минерализованных зон дробления и смятия / Б.Б.Евангулов, С.В.Сендек, Л.Н.Черник, А.В.Лебедев, В.И.Куля, Н.Н.Девнина // Зап. Ленингр. горного ин-та. 1975. Т.68, вып. 2. С.75-91.

5. Особенности проявления золото-кварцевой формации в дайковых породах (на примере золотопроявлений Северо-Востока СССР) / С.В.Сендек, Б.Б.Евангулов, В.А.Кузнецова, К.В.Кистеров, В.И.Куля, А.А.Федченко, Л.Н.Черник // Зап. Ленингр. горного ин-та. 1985. Т.104. С.69-75.

6. Сендек С.В. О некоторых общих особенностях рудных столбов золоторудных месторождений различных формаций Северо-Востока СССР // Зап. Ленингр. горного ин-та. 1983. Т.8[illegible] С.89-95.

7. Сендек С.В., Черник Л.Н. О признаках золотоносности кварцев в связи с их интр минерализационными преобразованиями (на примере Нежданинского месторождения) // Зап. Ленингр. горного ин-та. 1973. Т. 65, вып. 2. С.48-52.

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