

УДК 550.812:51:553.3.071

А.В. Загибалов

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ РАЗВЕДОЧНЫХ ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

Рассматриваются вопросы оценки погрешностей данных, участвующих при подсчете запасов россыпных месторождений золота методом вертикальных сечений. Оцениваются такие параметры как погрешность среднего содержания, погрешность определения мощности пласта, погрешность вертикального запаса. При оценке анализируется влияние гранулометрического размера золота, уровня содержания в россыпи, параметры и тип разведочной выработки (скважина или шурф), интервал опробования. Приводятся выводы, позволяющие предварительно оценить результаты разведки с целью достоверной оценки запасов в россыпи.

Ключевые слова: погрешность подсчета запасов, содержание золота, вертикальный запас, гранулометрический размер золота, скважина, шурф, интервал опробования.

При подсчете запасов золота в россыпных месторождениях, разведанных сериями параллельных линий скважин и других выработок, широкое распространение имеет метод вертикальных сечений. Суть метода состоит в определении линейных запасов металла в пределах разведочных линий, на которые опирается подсчетный блок и распространении этих линейных запасов на всю длину блока. Ошибка подсчета запасов будет определяться погрешностями установления границ подсчетного блока и определения линейных запасов по разведочным линиям. В свою очередь погрешность линейного запаса будет в полной мере зависеть от количества разведочных выработок, расстояния между ними и ошибки определения вертикального запаса по каждой разведочной выработке.

Таким образом, чтобы установить погрешность подсчета запасов в пределах блока необходимо, прежде всего, установить погрешность вертикального запаса по разведочной вы-

работке. Немаловажную роль в подсчете запасов также играет надежное определение среднего содержания и мощности золотоносных песков.

Погрешности вертикального запаса, мощности и содержания, в свою очередь, есть производные от величины крупности золота, уровня содержания в месте отбора пробы и объема пробы. Последняя из перечисленных составляющих зависит от поперечного сечения вертикальной горной выработки и интервала опробования. При этом мы не рассматриваем технические ошибки, возникающие при проходке выработки и погрешности отбора пробы. Иными словами погрешности вертикального запаса, мощности песков, содержания можно описать уравнениями

$$\Delta P_{\%} = f(C, D, L, Me)$$

$$\Delta M_{\%} = f(C, D, L, Me)$$

$$\Delta C_{\%} = f(C, D, L, Me)$$

где $\Delta P_{\%}$ - погрешность определения вертикального запаса; $\Delta M_{\%}$ -

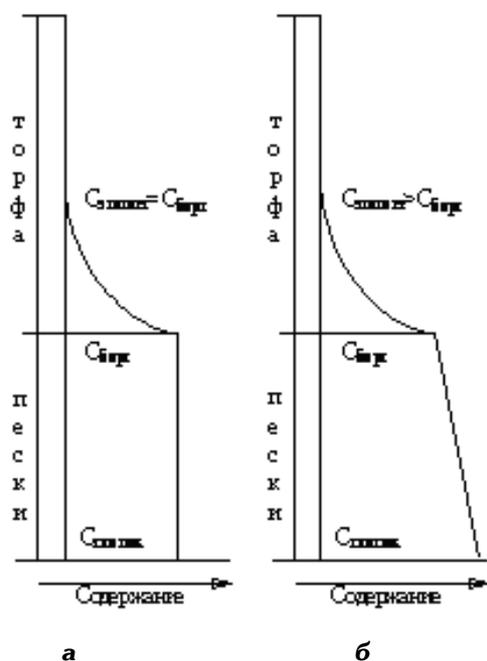


Рис. 1. Схема построения эталона скважины

погрешность определения мощности; $\Delta C\%$ - погрешность определения содержания; Me - медиана гранулометрического спектра золота, мм; C - содержание золота в месте отбора валовой пробы, г./м³; D - диаметр скважины или длина стороны разведочного шурфа; L - интервал опробования горной выработки.

С целью установления погрешности вертикального запаса была создана имитационная модель разведочной выработки (рис. 1). Суть модели заключается в следующем.

Как известно из практики, границу торфов (породы, не содержащей полезного компонента, или с содержанием полезного компонента ниже установленного уровня) и золотоносных песков устанавливают по пробе, имеющей содержание золота равной или выше бортового содержания.

Для модели разведочной выработки принимаем условие, что содержание золота в торфах равно нулю от

начала выработки до некоторой точки перед песками, далее по экспоненте до точки границы торфов и песков, которая определяется бортовым содержанием и далее в песках по прямой таким образом, чтобы среднее содержание золота в песках соответствовало заданному среднему содержанию по выработке. Если уровень содержания в выработке равен бортовому содержанию, то содержание золота в песках будет постоянным (рис. 1, а). Если уровень содержания в выработке установить выше бортового, то содержание в песках будет возрастать от бортового до некоторого содержания на уровне плотика таким образом, чтобы среднее содержание

в песках было равно заданному содержанию (рис. 1, б).

Такая модель изменения уровня содержания в наибольшей мере соответствует данным практических исследований. Так Н.А.Шило [7] приводит диаграммы распределения содержания золота в вертикальных разрезах аллювиальных россыпей (рис. 2). Выделение закономерной составляющей из этих диаграмм приводит ее к подобию созданных нами моделей.

Далее весь прокол разведочной выработки разбивается на интервалы опробования и в каждом интервале определяется содержание золота.

Статистический анализ гранулометрических расситовок золота, используемых в данной работе, показывает, что распределение золота подчиняется либо логарифмически нормальному распределению, либо распределению Вейбулла. Ряд исследователей (Родионов Д.А. [4], Разумовский Н.К. [5] и др.) считают, что наи-

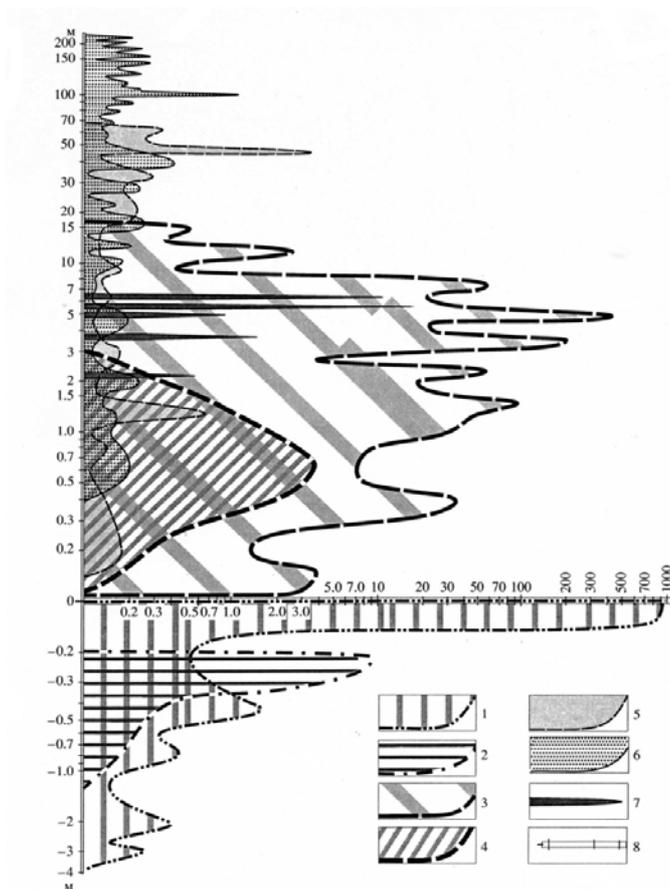


Рис. 2. Распределение золота в вертикальных разрезах россыпей (по данным Ю.И.Гольдфарба): 1–7 — обобщенные графики концентраций золота (г/м^3) в россыпях: 1 — перлювиальных, 2 — щеточных, 3 — эрозийных, 4 — шлейфовых, 5 — гравитационных, 6 — аккумулятивных, 7 — косовых и равновесных; 8 — поверхность плотика

более распространенной моделью распределения эмпирических данных является логарифмически нормальная функция. Однако при использовании логарифмически нормальной функции нередко возникают трудности, связанные с расчетами и произвольным выбором более общего типа преобразующих функций, что делает логнормальную функцию неудобной. При моделировании случайной величины, распределенной по логариф-

мически нормальному закону, возникают трудности, связанные с переводом заданного стандарта изменчивости содержания золота в стандарт логарифмический. Шиманский А.А. и Базанов Г.А. [8] предлагают в качестве теоретической функции распределения компонентов в горных породах функцию распределения Вейбулла. Распределение Вейбулла отличается простотой расчета и дает в большинстве случаев более удовлетворительные результаты, чем логнормальная функция. Функция распределения Вейбулла описывается выражением

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^m}$$

где b — параметр масштаба ($b > 0$); m — параметр формы ($m > 0$); X — случайная величина.

Формирование содержания в каждом интервале опробования осуществляется путем моделирования случайных величин, подчиняющихся закону распределения Вейбулла с заданными математическими ожиданиями и дисперсиями.

Случайные числа, имеющие статистическое распределение Вейбулла с заданными параметрами, получаются из случайных чисел для равномерного (на отрезке от 0 до 1) распределения с помощью соотношения

$$W_{b,m} = \frac{\ln[-\ln(1-R)]}{m * b}$$

где R - случайное число, подчиняющееся равномерному закону распределения.

При мелком золоте результат разведки, как скважинами, так и шурфом практически повторяет эталон. Интервал опробования при этом практически роли не играет. При крупном золоте россыпь разбивается на ряд прослоек. Содержание в пробах по всем выработкам изменяется от нулевого до ураганного. Появление в торфах проб с содержанием выше бортового крайне редко, и если они встречаются, то к промышленной отработке не целесообразны. При мелком золоте закономерные составляющие, определенные по вторым разностям Е.И. Попова [3] для исследуемых горных выработок равны 1.0, а при крупном золоте они очень близки к нулю, за исключением шурфа, где $\eta_{\text{зак}}^2 = 0.31$.

При мелкой granulometрии золота эталон наиболее точно повторяется при разведке (при интервале 0.4 м) кустом из 5 скважин и шурфом. При этом при разведке кустом наблюдается разрыв песков в верхней части, что можно объяснить уменьшением уровня содержания и, как следствие, увеличением погрешности опробования. Разведка скважиной дает "рванный" вертикальный разрез. Величины закономерной составляющей по выработкам равны для скважины, куста скважин и шурфа 0.44, 0.75 и 0.93 соответственно. При разведке эталона с интервалом 1.0 м величины закономерной составляющей равны 0.70, 0.82 и 0.98 для тех же выработок соответственно.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- при разведке любыми выработками происходит завышение среднего содержания при мелком золоте и занижение содержания при крупном.

- дисперсия содержания по разведочным выработкам завышена по отношению к дисперсии эталонной выработки при любом интервале опробования и при любой granulometрии золота, что говорит о большой погрешности определения содержания.

- мощность песков, вскрываемая скважинами, всегда занижается и зависит от крупности металла. На россыпях со средним и крупным металлом на оценку вскрываемой мощности влияет интервал опробования.

По каждому интервалу опробования определяется вертикальный запас произведением содержания в интервале на длину интервала.

При определении вертикального запаса и среднего содержания по выработке осуществляется группировка интервалов таким образом, чтобы минимальная длина пустого прослоя (прослоя с содержанием меньше бортового) была не менее предварительно заданной, определяемой технологическими условиями отработки россыпи. Далее определяется среднее содержание золота и вертикальный запас на всю длину выработки, на интервалы с содержанием выше бортового, определяется мощность золотоносного пласта. Модель разведки каждой выработки повторяется не менее 150 раз для определения абсолютной и относительной погрешности искомых величин.

Функции зависимости погрешностей вертикального запаса ($\Delta P_{\%}$), мощности ($\Delta M_{\%}$) и содержания ($\Delta C_{\%}$) от granulometрического спектра, уровня содержания в горной выработке, поперечного размера выработки и интервала опробования можно получить в результате определения коэффициентов уравнения множественной регрессии:

$$\Delta P_{\%} = \alpha_0 + \alpha_1 * Me + \alpha_2 * C + \alpha_3 * D + \alpha_4 * L$$

$$\Delta M_{\%} = \alpha_0 + \alpha_1 * Me + \alpha_2 * C + \alpha_3 * D + \alpha_4 * L$$

$$\Delta C_{\%} = \alpha_0 + \alpha_1 * Me + \alpha_2 * C + \alpha_3 * D + \alpha_4 * L$$

Нахождение коэффициентов уравнения множественной регрессии α_i в этих линейных уравнениях осуществляется по методу наименьших квадратов путем решения системы нормальных уравнений, которую в матричной форме можно записать следующим образом:

$$[X] * [a] = [Y]$$

где $[Y]$ - матрица, столбцы которой состоят из сумм квадратов и смешанных произведений переменной Y_i , (в нашем случае – либо погрешности вертикального запаса, либо мощности или содержания) с переменными Me_i, C_i, D_i, L_i ; $[X]$ - матрица сумм квадратов и смешанных произведений степеней переменных Me_i, C_i, D_i, L_i ; $[a]$ - столбец искомым коэффициентов.

Величина линейной зависимости между отдельными показателями уравнения определяется матрицей коэффициентов множественной корреляции. Качество множественной регрессии оценивалось критерием Фишера.

Для исследования поведения таких показателей, как мощность золотосодержащего песка, среднее содержание на пласт песка и вертикальный запас, было проведено моделирование разведочной скважины и шурфа. При моделировании выбирались исходные данные для следующих вариантов сочетаний:

- диаметр скважины равен 0.1, 0.3 и 0.5 м;
- длина стороны квадратного шурфа 1.0, 1.5, 2.0 м;
- интервал опробования скважины или шурфа 0.1, 0.2, 0.5 м;
- уровень среднего содержания 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 и 5.0 г/м³;
- бортовое содержание $C_{борт} = 100$ мг/м³;

- золото с медианного размера равного 0.7, 1.6, 2.2, 3.7 и 5.5 мм.

Мощность торфов принималась равной 5 метрам, а мощность песков - 2 метра. Таким образом, в выработке отбиралось от 14 (при интервале опробования 0.5 м.) до 70 (при интервале 0.1 м.) проб. По данным моделирования определялись следующие параметры:

- мощность песков по эталону и по модели, коэффициент вариации по мощности, относительное отклонение средних мощностей;

- среднее содержание металла на всю длину выработки по эталону и по модели, относительное отклонение средних содержаний и коэффициент вариации содержания на всю длину выработки;

- указанные выше параметры для содержания, но только на мощность пласта, которая была включена в подсчет запасов по выработке;

- вертикальный запас золота в выработке по эталону и по результатам моделирования, их относительное расхождение и коэффициент вариации вертикального запаса по результатам моделирования.

Ниже произведена оценка погрешностей вертикального запаса, среднего содержания и мощности, вскрываемых различными горными выработками.

1. Оценка параметров разведки скважинами.

Из анализа модели вертикального запаса при моделировании разведки скважиной наиболее значимые зависимости наблюдаются между погрешностью вертикального запаса и крупностью золота (коэффициент корреляции $r=0.60$), и диаметром скважины ($r=-0.48$). Зависимость между интервалом опробования и погрешностью вертикального запаса незначительна ($r=-0.01$). Уравнение зависимости по-

грешности вертикального запаса по скважине от исследуемых параметров в результате множественной регрессии выглядит следующим образом:

$$\Delta P_{\%} = 160 + 40 * Me - 20 * C - 330 * D$$

Так, например, при медианном размере золота 2 мм, среднем содержании золота в точке опробования 0.5 г/м³ (500 мг/м³) и диаметре разведочной скважины 0.1 м (100 мм) погрешность определения вертикального запаса будет равна 197 %.

Погрешность определения содержания в скважине в наибольшей степени зависит от медианного размера золота ($r=-0.58$) и диаметра скважины ($r=-0.47$). Интервал опробования на погрешность содержания в скважине существенной роли не играет. Уровень содержания также влияет на погрешность содержания ($r=-0.29$), хотя и в меньшей мере, чем крупность золота и диаметр разведочной скважины. Уравнение множественной регрессии для определения погрешности содержания в скважине приведено ниже

$$\Delta C_{\%} = 170 + 45 * Me - 20 * C - 360 * D$$

По данным указанным выше погрешность содержания составит 124 %.

Погрешность определения мощности песков при разведке скважиной можно определить из уравнения множественной корреляции:

$$\Delta P_{\%} = 50 + 8 * Me - 9 * C - 73 * D - 45 * L$$

Из анализа результатов моделирования на погрешность определения мощности песков наибольшее влияние оказывает уровень содержания в точке опробования ($r=-0.52$) и крупность металла ($r=0.44$). Диаметр скважины ($r=-0.39$) и интервал опробования ($r=0.25$) также весьма значимы при определении мощности песков. Если для определения вертикального запаса и среднего содержания интервал

опробования существенной роли не играет, то при определении мощности увеличение интервала опробования повышает погрешность мощности.

Очевидно, что дисперсия погрешности вертикального запаса включает в себя дисперсии погрешностей содержания и мощности. Однако, по результатам моделирования выяснилось, что дисперсия погрешности содержания превышает дисперсию погрешности вертикального запаса, из чего можно сделать вывод, что между погрешностью содержания и погрешностью мощности существует значительная корреляционная зависимость. Матрица коэффициентов корреляции между погрешностью вертикального запаса, погрешностью содержания и погрешностью мощности, приведенная в табл. 1, подтверждает наши выводы.

Анализ результатов моделирования опробования скважины для разного по крупности золота позволяет сделать следующие обобщенные выводы.

- при крупном золоте происходит занижение мощности песков по отношению к эталону. При среднем по крупности золоте вскрываемая мощность песков в среднем равна истинной мощности и при мелком происходит завышение вскрываемой мощности.

- при увеличении уровня эталонного содержания происходит повышение величины вскрываемой мощности и приближение ее к эталонному значению. Особенно это сильно сказывается при крупном золоте.

- погрешность вертикального запаса по скважине колеблется в пределах от 10 до 550 %. Погрешность вертикального запаса до 100 % на мелком и среднем золоте позволяет применять скважину как средство разведки, что нельзя сказать относительно россыпей с крупным и весьма крупным золотом.

Таблица 1

Матрица коэффициентов корреляции между погрешностями вертикального запаса, содержанием и мощностью по скважине

Погрешность	Верт. запас	Содержание	Мощность
Верт. запас	1.00	0.94	0.78
Содержание		1.00	0.73
Мощность			1.00

- разведка скважиной, при уровне содержания золота в россыпи 200 – 500 мг/м³, возможна только на золоте, по гранулометрическим характеристикам относящегося к мелкому или среднему. На крупном, по гранулометрическим характеристикам золоте, разведка скважиной может быть допущена только на россыпях с высоким уровнем содержания. В этом случае погрешность содержания по скважине не превысит 100 %. При низком уровне содержания (200 – 500 мг/м³) погрешность достигает 300 – 400 % для крупного и весьма крупного золота.

- независимо от уровня содержания и гранулометрического размера золота происходит завышение среднего содержания в выработке. Это связано с появлением проб с ураганным содержанием, обусловленных неравномерностью гранулометрического спектра.

2. Оценка параметров разведки шурфами

В данном разделе устанавливалась функциональная зависимость погрешностей вертикального запаса, вскрываемых мощностей пласта и среднего содержания по разведочному шурфу от величины крупности золота, уровня среднего содержания по шурфу, поперечных размеров шурфа и интервалов опробования.

Результаты моделирования показывают, что погрешность вертикаль-

ного запаса для разведочного шурфа так же, как и для скважины в наибольшей степени зависит от крупности золота ($r=0.70$) и уровня среднего содержания ($r=-0.42$) в месте проходки шурфа. Поперечный размер шурфа играет незначительную роль в погрешности вертикального запаса ($r=-0.26$). Интервал опробования на погрешность вертикального запаса не влияет ($r=-0.01$).

Уравнение множественной корреляции для погрешности вертикального запаса приведено ниже:

$$\Delta P_{\%} = 30 + 10 * Me - 6 * C - 16 * S$$

Так, при стороне шурфа 1.5 м, медиане золота 2 мм, уровне содержания 200 мг/м³ погрешность вертикального запаса будет равна 23%.

Уравнение погрешности вскрываемого содержания по разведочному шурфу по результатам моделирования можно представить выражением:

$$\Delta C_{\%} = 35 + 10 * Me - 5 * C - 15 * S$$

Как и в предыдущих вариантах моделирования, погрешность содержания в наибольшей степени зависит от крупности золота ($r=0.65$). Размер шурфа и уровень содержания также влияют на погрешность содержания, хотя и в меньшей мере (коэффициенты корреляции равны $r=-0.25$ и $r=-0.32$ соответственно). Интервал опробования на погрешность содержания не влияет ($r=-0.05$).

Погрешность вскрываемой мощности в значительной мере зависит от интервала опробования шурфа ($r=-0.50$), крупности золота ($r=0.47$) и уровня содержания ($r=-0.33$). Поперечный размер выработки на погрешность существенного влияния не оказывает ($r=-0.18$). Зависимость по-

грешности вскрываемой мощности можно представить выражением:

$$\Delta M_{\%} = 16 + 3 * Me - 2 * C - 5 * S + 35 * L$$

Вскрываемая мощность песков в среднем равна эталонной, однако при интервале опробования 0.5 м она всегда оказывается завышенной. Уровень эталонного содержания практически не влияет на вскрываемую мощность, за исключением случая с очень низким содержанием. При увеличении медианного размера золота появляется зависимость между вскрываемой мощностью и уровнем эталонного содержания.

Погрешность вертикального запаса по шурфу изменяется в пределах от 5 до 85 %. При уровне содержания свыше 220 мг/м³ шурф можно применять как средство разведки практически при любом по крупности золоте. Погрешность определения среднего содержания по шурфу в среднем не превышает 60 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что применяемый в настоящее время поперечный размер разведочного шурфа является достаточным для достоверной оценки запасов практически для любых россыпей. Для весьма крупного золота рекомендуется увеличить поперечный размер шурфа.

С учетом результатов моделирования по скважине можно сделать вывод, что при мелком и среднем золоте и уровне содержания свыше 100 мг/м³ следует применять как разведочное средство скважину диаметром не менее 0.3 м.

При меньшем уровне содержания или при крупном золоте (с $Me > 2.5$ мм) следует применять шурф площадью поперечного сечения не менее 2.25 м². Однако применение шурфа с таким поперечным сечением как средства разведки на весьма крупном золоте сопряжено с большим риском неподтверждения запасов.

В любом случае разведки интервал опробования можно принять равным 0.2 м, если отработка россыпи будет производиться подземным способом, или открытым с отдельной вскрышей торфов. Если отработка месторождения будет производиться дражным способом без предварительной вскрыши, интервал опробования можно увеличить.

На основании анализа результатов моделирования разведки различными горными выработками можно сделать следующие выводы.

1. при разведке россыпи любыми разведочными средствами происходит завышение среднего содержания при любом по крупности золоте. Дисперсия содержания в разведочной выработке всегда завышена по отношению к дисперсии содержания при разведке эталонной выработки, что говорит о большой погрешности содержания.

2. мощность песков всегда занижается, и точность ее определения зависит от величины интервала опробования и крупности металла.

3. вертикальный запас в большинстве случаев разведки при любых вертикальных выработках соответствует истинному запасу, однако его погрешность колеблется в очень широких пределах и зависит от поперечного размера выработки. Интервал опробования при этом никакой роли не играет.

4. на россыпях с мелким и средним золотом при уровне содержания более 1.0 г/м³ в качестве средства разведки можно рекомендовать скважину диаметром не менее 0.3 м с интервалом опробования 0.2 м. При уровне содержания до 1.0 г/м³ и при крупном золоте следует применять в качестве разведочного средства шурф с площадью поперечного сечения не менее 2.5 м².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Методика* разведки россыпей золота и платиноидов. Под ред. И.Б.Флерова и В.И.Курторгина / Центр, науч.-исслед. геол. развед. ин-т цвет. и благ. мет. ЦНИГРИ. - М. 1992.
2. *Методические указания* по разведке и геолого-промышленной оценке месторождений золота. Под ред. Г.П. Воларовича / Центр, науч.-исслед. геол. развед. ин-т цвет. и благ. мет. ЦНИГРИ. - М. 1974.
3. Попов Е.И. К оценке точности изобращения залежи полезного ископаемого по данным разведки. - Л. Зап. ЛГИ, т. XXXVI, вып. 2, 1959.
4. Разумовский Н.К. Характер распределения содержаний металлов в рудных месторождениях. - Докл. АН СССР, № 9, 1940.
5. Родионов Д.А. Функции распределения содержаний элементов и минералов в изверженных горных породах. - М., Наука, 1964.
6. *Справочник* по математическим методам в геологии / Д.А. Родионов, Р.И. Коган, В.А. Голубева и др. - М.: Недра, 1987.
7. Шило Н.А. Основы учения о россыпях. - М.: Наука, 1981.
8. Шиманский А.А. Базанов Г.А. О возможности использования распределения Вейбулла при решении геохимических задач. В сб. Математические методы геохимических исследований. - М.: Наука, 1966.

■

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Загибалов Александр Валентинович – кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии Иркутского государственного технического университета, e-mail: azagibalov@yandex.ru



ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОРГАНИЗАЦИИ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Препринт

Хонходжаев Ф.Т., Антипова Н.М., Красная А.С., Прокофьева Е.Н., Тарасов Я.В., Павлова Н.В., Чекулаева К.А. – аспиранты, Московский государственный горный университет, ud@mstu.ru

Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). — 2011. — № 6. — 42 с. — М.: издательство «Горная книга»

Рассмотрены особенности и принципы управления вертикально-интегрированными компаниями, зависимость осуществления деятельности угледобывающего предприятия от их инфраструктурных и финансовых возможностей, меры по проведению реструктуризации горнопромышленной отрасли Республики Таджикистан.

INNOVATING PROCESSES IN AN ORGANIZATION OF MINING PRODUCTION

Honhodzhaev F.T., Antipov N.M., Krasnaya A.S., Prokofieva E.N., Tarasov Y.V., Pavlova N.V., Chekulaeva K.A

The features and principles of management of vertically integrated companies, the dependence of the activities of coal mining enterprises on their infrastructure and financial resources, measures for the restructuring of the mining industry in the Republic of Tajikistan are reviewed.