

УДК 622.02 : 622.342 (001)

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ РОССЫПНЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ОСВОЕНИЯ НА СЕВЕРЕ**

**Н. С. Батугина<sup>1</sup>, В. Л. Гаврилов<sup>1,2</sup>, С. М. Ткач<sup>1</sup>, Е. А. Хоютанов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,*

*E-mail: batuginan@mail.ru, просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,*

*E-mail: gvlugorsk@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрено влияние особенностей строения россыпных месторождений и распределения в них полезных компонентов на эффективность ресурсосберегающего извлечения запасов ценного минерального сырья. С учетом кластерной организации продуктивной толщи золотосодержащих песков ошибка геометризации для некоторых участков работ может превышать 100 %. Определены погрешности оценки запасов, показаны подходы, которые могут использоваться при управлении процессами разведки, добычи и обогащения. На примере ряда россыпных месторождений Якутии показано, что в числе основных причин возникновения ошибок при оценке запасов находятся неточность определения морфологии и структуры залежи, в первую очередь ее ширины, а также содержания золота в песках.

*Россыпное месторождение, запасы, кластерное строение, геометризация, достоверность, эффективность, потери, разубоживание*

DOI: 10.15372/FTPRPI20220307

В структуре добываемого минерального сырья россыпные месторождения занимают весомое положение, обеспечивая до 25–30 % мировой добычи золота, олова — 30 %, алмазов — 40 %. Освоение более сложных для разведки и разработки залежей со сравнительно низкими содержаниями полезных компонентов и небольшими общими запасами при перемещении центров эксплуатации в новые неосвоенные районы, включая Крайний Север, вызывают систематическое увеличение удельных затрат на единицу добытого металла, несмотря на постоянный прогресс в технике и технологиях.

Расширение и укрепление минерально-сырьевой базы россыпных месторождений, рост эффективности и качества ее подготовки к освоению, потребность комплексного освоения недр, разработка методов ускоренной геолого-экономической оценки предполагают повышение достоверности оценки запасов с геометризацией комплекса геологических переменных, определяющих эффективность техники и технологии добычи и переработки минерального сырья.

Большие затраты на разведку, оценку, опережающее и эксплуатационное опробование россыпных месторождений и их участков дополняются случаями неподтверждения и занижения запасов на 10–30 % и более, пропуска промышленных запасов при непредставительном и малообъемном опробовании и (или) редкой сети разведочных выработок [1]. Это свидетельствует о необходимости совершенствования средств и методов обеспечения достоверности исходных и формализованных данных и их геометризации. За последние 20 лет по Оймяконскому, Нерюнгринскому и Алданскому районам Республики Саха (Якутия) доля простых по геоморфологии залежей уменьшилась более чем вдвое при одновременном увеличении числа сложных.

На россыпях, для которых характерно неравномерное распределение полезных компонентов в продуктивной толще, при валовой добыче происходит разубоживание запасов бедными песками. Это приводит к увеличению объемов перерабатываемой горной массы, уменьшению в ней среднего содержания металла и коэффициента его извлечения, а в итоге — к повышению себестоимости конечной продукции. Кроме того, затраты на добычу металла по причине зависимости от мощности торфов, песков в целом и их продуктивного слоя, гипсометрии, гранулометрического состава золота и его среднего содержания, доли глины в песках даже в пределах одной россыпи изменяются от участка к участку в несколько раз. Однако при оконтуривании и оценке запасов данное обстоятельство, как правило, учитывается не в полной мере, что приводит к существенным ошибкам в определении экономически целесообразных границ их разработки [2–3]. Некоторые из балансовых блоков, предназначенных к отработке, оказываются в действительности убыточными. В то же время определенная часть забалансовых запасов, обычно теряемых в недрах, могла бы с полным основанием вовлекаться в эксплуатацию, поскольку это экономически целесообразно.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На достоверность определения запасов, помимо обоснованности методик их подсчета, влияет множество факторов: правильность расчета и применения кондиций, изученность морфологических, структурных и тектонических особенностей месторождения, изменчивость форм продуктивных тел, перспективность месторождения по запасам на флангах, по глубине и т. п.

При вовлечении месторождения в освоение инвестор и недропользователь ожидают получения определенного экономического эффекта, рассчитываемого на основе данных разведки. Погрешности исходных данных различного рода могут обуславливать снижение и даже полную потерю этого эффекта. Примером достаточно успешного решения данного вопроса может быть угольная отрасль, для которой разработаны специальные методики [4].

В качестве одного из основных показателей разведанности запасов рудных и россыпных залежей предлагалось использовать точность и достоверность их оценки [5]. Наиболее приемлемой мерой изученности морфологии таких месторождений здесь рассмотрена ошибка геометризации запасов  $\Delta$  (в %), которая отражает степень детальности и достоверности представлений о положении контуров залежей, построенных по разведочным линиям; о формах, размерах и условиях их залегания. Ошибка геометризации запасов может быть вычислена по формуле [5]

$$\Delta = 100 \frac{\sum |S'|}{2S_i},$$

где  $\sum |S'|$  — сумма площадей залежи с учетом вышедших за пределы разведочного контура и площадей безрудных пород, вошедших в него;  $S_t$  — истинная площадь залежи.

За количественный критерий допустимости отнесения запасов к категории разведанных можно принять 50% [5]. Считается, что точность оценки среднего содержания полезного компонента имеет более важное значение, чем точность оценки запасов в целом, так как это влияет на себестоимость продукции с первых дней функционирования предприятия.

Суммарная погрешность определения запасов складывается из погрешностей определения параметров месторождения. Она может быть найдена из выражения

$$\delta_Q = \sqrt{\delta_S^2 + \delta_m^2 + \delta_{G_a}^2 + \delta_d^2},$$

где  $\delta_Q$  — относительная средняя квадратическая погрешность оцениваемых запасов;  $\delta_S, \delta_m, \delta_{G_a}, \delta_d$  — относительные средние квадратические погрешности оценок подсчетных параметров (площади, мощности, содержания, объемной массы соответственно).

В качестве возможного методического подхода к определению необходимой и достаточной точности оценки основных геологических показателей на разных стадиях определения промышленной значимости месторождений и их участков можно предложить следующую концепцию. Суммарный экономический эффект от освоения месторождения в целом или некоторой его части за все время отработки или за определенный промежуток времени (например, месяц, год и т. д.) выражается функцией соответствующих геологических параметров:

$$\Theta = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_m),$$

где  $x_n$  — геологические параметры;  $y_m$  — прочие параметры, совокупность которых в дальнейшем обозначим  $y$ .

Таким образом, эффект от освоения месторождения или его части есть функция случайных геологических переменных и других случайных параметров. Ошибку функции (только от геологических переменных) можно представить в виде

$$\sigma_E \leq \sum_{i=1}^n \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \sigma_{x_i}. \quad (1)$$

Задавая далее допустимое значение ошибки в оценке эффекта  $\sigma_E$ , можно ранжировать геологические переменные  $x_i$  по их вкладу в ошибку  $\sigma_E$  и определить допустимые ошибки измерения и оценки геологических параметров  $\sigma_{x_i}$ .

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Эффект от освоения однородной по технологическим свойствам части месторождения (например, в объеме годовой добычи) можно записать как

$$\Theta = \frac{Sm y G_a J (1-L)}{1-D} J(P-C), \quad (2)$$

где  $S, m$  — площадь и мощность заданного блока соответственно;  $G_a$  — среднее содержание полезного компонента;  $J$  — коэффициент извлечения;  $L$  — потери;  $D$  — разубоживание;  $P, C$  — цена и затраты на единицу конечного продукта соответственно.

Для выражения (2) относительную ошибку расчета эффекта от освоения месторождения или его участка представим в виде [6]

$$\frac{\sigma_E}{\Xi} \approx \left(\frac{\sigma_S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{G_a}}{G_a}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_J}{J}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{L} \frac{L}{1-L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_D}{D} \frac{D}{1-D}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_P}{P} \frac{1}{1-K}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_C}{C} \frac{K}{1-K}\right)^2, \quad (3)$$

где  $\sigma_x$  — средняя квадратическая ошибка аргумента ( $S, m, y, G_a, J, L, D, P, C$ );  $K = C/P$ .

Степень и характер влияния прочих параметров ( $y$ ) на относительное изменение прибыли горного предприятия рассмотрены в [6]. Далее описано влияние геологических параметров ( $x$ ) на эффективность освоения россыпных месторождений.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения рассматриваемой задачи важно, что затраты  $C$  зависят от многих геологических параметров, а ошибка прогноза затрат — от ошибок их определения. Надежное определение среднеквадратической ошибки затрат  $\sigma_C$  возможно путем построения и анализа статистической многофакторной модели затрат, учитывающей действие рассматриваемых переменных. Однако одним из основных геологических факторов, влияющих на уровень затрат, будет ошибка геометризации запасов, которая не нашла прямого отражения в (1). Ошибочная геометризация приводит к бросовым горным выработкам, росту (в несколько раз) потерь и разубоживания, нерациональному выбору системы ведения горных работ и ее параметров, техники и технологии добычи, а также другим негативным последствиям.

Ошибка оценки геологических параметров на практике может быть велика, что приводит к неверному расчету эффекта от освоения месторождения или его участка. Систематические ошибки занижения среднего содержания  $G_a$ , площади балансовых запасов  $S$ , мощности продуктивных пластов  $m$  и запасов  $Q$  достигают по россыпным месторождениям золота, олова, алмазов при существенно непредставительном опробовании 25–90%, а прирост балансовых запасов при представительном опробовании на ряде объектов доходит до 100–200% [1, 7].

Сравнение данных, полученных при разведке и разработке золотосодержащих россыпных месторождений, показывает, что погрешности подсчета запасов колеблются от –7 до +32%, а погрешности подсчета ширины россыпи — от –50 до +10% [1].

Рассмотрим примеры относительной ошибки среднего содержания  $G_a$ , площади балансовых запасов  $S$ , мощности продуктивных пластов  $m$  и получаемого эффекта  $\Xi$  по отдельным россыпным месторождениям, обрабатываемым на территории Якутии (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Расчеты погрешности определения основных параметров по ряду россыпей Якутии\*, %

Россыпное месторождение	Относительная ошибка определения			
	$S$	$m$	$G_a$	$\Xi$
Ручей Сохатиный – Малый Сохатиный	–25.4	–18.5	–15.2	–34.9
Менджель	–12.0	11.4	18.8	25.1
Ольчан-Смородина	–7.9	16.4	–46.7	50.1
Ручей Вилка	–13.3	13.2	8.9	20.7
Ручей Кенер-Сала	12.3	19.1	12.5	26.0
Ручей Хатыннах	–24.1	–13.0	–9.1	–28.8
Эбир-Хая	8.2	–10.4	–18.2	–22.5

\* по данным золотодобывающих предприятий

Приведенные данные свидетельствуют о важности достижения максимально точного модельного представления о реальной морфологии россыпных месторождений. Анализ данных разведки и эксплуатации россыпных месторождений в бассейне р. Колымы и в верховьях р. Индигирки показал, что одной из основных причин ошибочной оценки эффекта от освоения россыпных месторождений является неточность определения морфологии и структуры россыпи. Погрешности зависят в первую очередь от ширины россыпей и содержания золота. При существующих технике, технологиях добычи и переработки песков некачественная горно-геологическая подготовка месторождений и их участков снижает эффект от освоения на 20–60 %.

Характерным примером нерационального освоения россыпей Якутии в целом является уровень извлечения из песков мелкого и тонкого золота. Эффективно извлекается 97–98 % золотин с размерами более 0.2 мм. Извлечение класса 0.1–0.2 мм не превышает 60 %, а класс менее 0.1 мм при традиционных схемах обогащения может уходить в хвосты. При разведке и разработке россыпей определяется и подсчитывается содержание только извлекаемого золота, поэтому на всех отработанных и отрабатываемых месторождениях практически неизвестным остается полное содержание золота (с учетом всего спектра гранулометрического состава) и, соответственно, доля теряемой ценности. Класс менее 0.1 мм составляет на большом числе месторождений 20 % и более [8].

Следует отметить уникальный эксперимент П. А. Аммосова, описанный в [9]. Из уральских россыпей золота отбиралось 160 т песка. После тщательного перемешивания пески делились на несколько частей и последовательно обрабатывались различными способами. Результаты исследования приведены ниже:

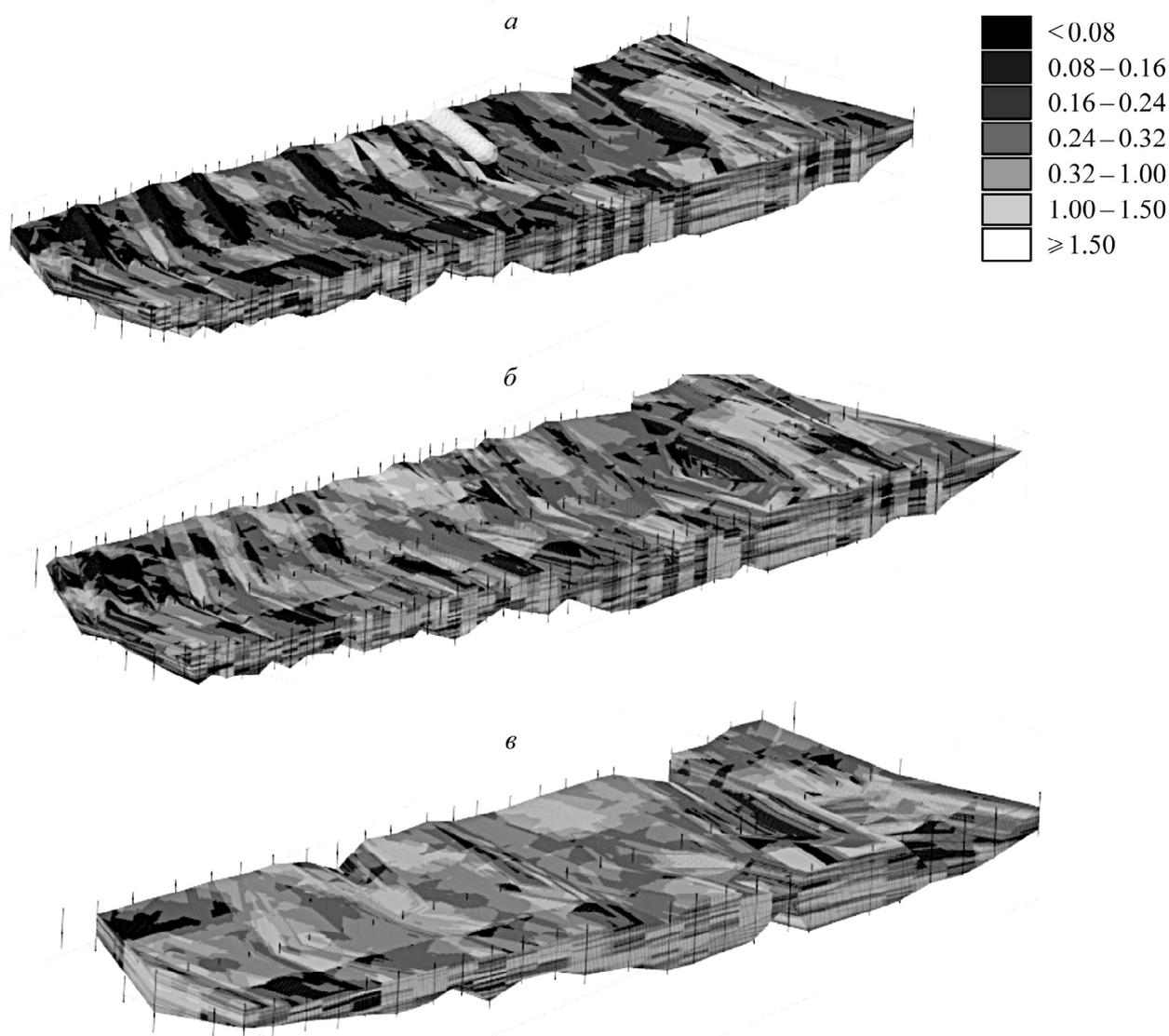
Способ обработки песков	Содержание золота, г/т
Промывка 100 т песков без амальгамации на обыкновенных грохотах	0.40
Более тщательная ручная промывка 8 т песка	0.55
Промывка 30 т песка с амальгамацией	5.10
Обыкновенная доменная плавка 50 т песка на чугун	94
Растворение нескольких проб песка по 4.5 кг в царской водке и осаждение железным купоросом	117

При традиционном способе опробования россыпных месторождений с крупным золотом содержание металла в песках из-за существенной непредставительности геологического опробования может систематически занижаться до 2–10 и более раз, что приводило и приводит к пропуску промышленных участков и (или) к так называемым “коэффициентам намыва” золота [9]. Следует отметить закономерности роста ошибок геометризации и оценки всех геологических параметров (запасов, среднего содержания, распределения запасов по сортам руд, обогатимости, коэффициента извлечения и др.) по мере уменьшения размеров участков месторождения (подсчетных блоков). Так, ошибки в оценке геологических показателей в пределах участков месячной отработки значительно выше, чем для участков годовой отработки [10–13].

Более представительное опробование россыпных месторождений, уточняющее сплошность, мощность и площадь запасов продуктивных песков, обеспечивает рост запасов в среднем в 2.5 раза с повышением среднего содержания полезного компонента.

Изменчивость показателей в пространстве является природным неотъемлемым свойством геологических тел. При последовательном увеличении, например, минимального промышленного содержания полезного ископаемого россыпь начинает терять свою конфигурацию, затем теряет сплошность и распадается на несколько самостоятельных тел, линз, гнезд, лент и т. п.

Проиллюстрируем этот факт на примере построенной в горно-геологической информационной системе Micromine блочной модели одной из крупнейших на Дальнем Востоке обрабатываемой в Южной Якутии Куранахской россыпи, представленной преимущественно мелкодисперсным золотом. Для демонстрации отобран участок месторождения площадью  $0.3 \text{ км}^2$ , ограниченный разведочными линиями 216–218, имеющий 152 скважины с более чем 13.6 тыс. проб (рисунок). На выбранном участке расстояние между скважинами в разведочных линиях находится в диапазоне от 12 до 50–70 м, линии отдалены друг от друга на 100–180 м. По заданным бортовым содержаниям ( $0.10$  и  $0.16 \text{ г/м}^3$ ) выделены “рудные интервалы”, которые в последующем были оконтурены по разведочным линиям. Далее контуры соединялись в каркас, на основе которого строилась блочная модель с размерами блоков  $2.5 \times 5 \times 1 \text{ м}$  по осям  $X, Y, Z$  соответственно. Интерполяция содержаний в блочной модели производилась методом обратных расстояний (IDW) со следующими параметрами: композитирование проб по  $0.5 \text{ м}$ ; степень 2; режим поиска данных — сферический с использованием множественных прогонов.



Блочные модели участка Куранахской россыпи по бортовым содержаниям  $0.1 \text{ г/м}^3$  (а),  $0.16 \text{ г/м}^3$  (б) и  $0.16 \text{ г/м}^3$  с разреженной в профилях сеткой скважин (в)

Анализ рассмотренных вариантов с бортовыми содержаниями 0.1 и 0.16 г/м<sup>3</sup> по фактической плотности разведочной сети (рисунок, а, б) и с ее разрежением при чередовании через одну скважину (рисунок, в) показывает следующее. Объем золотосодержащих песков уменьшается с 13.1 до 12.4 и 10.8 млн м<sup>3</sup> с одновременным снижением запасов драгоценного металла с 3.55 до 3.46 и 3.07 т при практически равном среднем содержании по вариантам (0.27, 0.28, 0.29 г/м<sup>3</sup> соответственно). Структура запасов по выделенным диапазонам средних содержаний золота также почти не изменяется. Увеличение бортового содержания оказывает влияние на конфигурацию в пространстве относительно бедных и богатых участков. При увеличении плотности разведочной сети становится более наглядной дифференциация запасов по содержаниям. Данные факты должны учитываться при планировании горных работ, выборе способов валовой или селективной отработки отдельных участков, альтернативных технологий обогащения.

Согласно общепринятым подходам, промышленное содержание устанавливается для каждого месторождения (иногда — района) в зависимости от геолого-экономической оценки и отличается для разных районов и однотипных по основному компоненту месторождений в разы. В результате на разных месторождениях в забалансовые запасы попадают пески, отличающиеся по содержанию в 2–4 раза.

Из-за отработки богатых россыпей и вынужденного перехода на освоение менее ценных по среднему содержанию металла запасов кондиции при их подсчете меняются в сторону уменьшения со снижением минимального промышленного и бортового содержаний. Таким образом забалансовые участки становятся промышленными. Характерным примером может служить Магаданская область, где среднее содержание золота в россыпях снизилось с 36.0 г/м<sup>3</sup> в 1933 г. до 0.4–0.5 г/м<sup>3</sup> в настоящее время [14]. В Якутии за последние 20 лет содержание уменьшилось в 1.9 раза с 1.8 до 0.95 г/м<sup>3</sup> [7–8].

Требования к параметрам районных кондиций для россыпей Верхне-Индигирского района в Якутии за период 1989–2020 гг. также существенно изменились (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Параметры кондиций для россыпей по Верхне-Индигирскому району Якутии\*, г/м<sup>3</sup>

Параметры	Верхне-Индигирский район				Ручей Берендей, 2015	Река Ольчан с притоками, 2016	Чугас, 2014
	1989	1998	2010	2018			
Минимальное промышленное содержание (МПС) без учета вскрыши	0.49	0.34	0.360	0.310	0.30	0.270	0.180
Увеличение МПС на единицу коэффициента вскрыши	0.13	0.07	0.058	0.041	0.12	0.050	0.041
Минимальное содержание в оконтуривающей выработке (МКВ) без учета вскрыши	0.24	0.13	0.218	0.160	0.19	0.108	0.09
Увеличение МКВ на единицу коэффициента вскрыши	0.07	0.04	0.029	0.027	0.08	0.025	0.032
Бортовое содержание в пробе	0.13	0.08	0.060	0.060	0.06	0.050	0.030

\*по данным Якутского филиала ФБУ ГКЗ

Бортовое содержание в пробе даже для удаленных участков составляет 30–60 мг/м<sup>3</sup> против 70–80 мг/м<sup>3</sup> для россыпей, обрабатываемых в 1990-е годы. Минимальное промышленное содержание снизилось в среднем с 0.2 до 0.1 г/м<sup>3</sup>. Данная ситуация, ввиду исчерпания запасов россыпного золота в старых горнопромышленных районах, приводит к повторной, иногда неоднократной переработке существующих гале-эфельных отвалов для продления сроков работы приисков и сохранения уровня золотодобычи.

Результаты промывки отвалов прошлых лет (25–30-летней давности) свидетельствуют о том, что содержание золота в них приближается к современным кондициям для открытых горных работ [8]. По данным [15], содержание золота в отвалах на приисках Колымы составляло 0.25–0.85 г/м<sup>3</sup>. В отвалах теряется не только мелкое, но и крупное золото, уровень потерь металла колеблется в пределах 1.5–15.0% [16].

Неоднородность свойств вмещающих пород, изменчивость мощности песков, их промывистости, среднего содержания и другие факторы приводят к тому, что поблочная производительность труда и себестоимость добычи горной массы на одном и том же месторождении может изменяться в 2–5 раз.

Не отрицая значимости различных инновационных геотехнологических решений и усовершенствований, следует акцентировать внимание на важном направлении снижения влияния рассмотренных особенностей россыпных месторождений, связанном с повышением точности и достоверности модельных представлений об осваиваемых объектах на основе широкого применения интенсивно развивающихся информационных технологий и расширяющихся возможностях существующих и новых методов компьютерного моделирования. В их числе можно отметить апробированный обобщенный метод оценки морфологии продуктивных толщ различных месторождений для трехмерного анализа форм их геологических границ [17].

Другим вариантом улучшения оценки и контроля запасов, определения взаимосвязей внутри продуктивных толщ, прогнозирования качества золота может быть комплексный подход к выполнению такого рода работ. Он основан на одновременном применении в различных вариациях дополняющих друг друга методов геостатистики, блочного моделирования, кластерного анализа и машинного обучения [18]. Важным аспектом рассмотренной проблематики является сближение зарубежных и российских способов подсчета запасов и оценки их достоверности с использованием сильных сторон блочного моделирования, компенсирующего недостатки традиционных методов расчетов, основанных часто на однократной оценке технико-экономического обоснования кондиций [19]. Однако эти актуальные темы связаны с другими исследованиями и выходят за рамки данной статьи.

## ВЫВОДЫ

Значимость достоверной оценки на разных стадиях разведки основных геологических параметров россыпных месторождений и их участков с кластерной формой распределения золота в песках в условиях ухудшения качества минерально-сырьевой базы возрастает.

Ошибки оценки россыпей связаны в основном с неправильным определением их типа, сложности, характера распределения полезного компонента в продуктивной толще. Непредставительное геолого-технологическое опробование и недостаточная разрешающая плотность сети разведки может приводить и приводит к пропуску участков балансовых запасов из-за систематических занижений содержаний золота. Площади балансовых и забалансовых запасов, мощности продуктивных пластов также могут занижаться.

Снижение рисков при обработке россыпей кластерного строения, связанных с некорректным выбором вариантов: геолого-экономической оценки, параметров вскрытия и разработки месторождений, уровня потерь и разубоживания, потенциально возможной прибыли, — может быть получено не только за счет различных геотехнологических и организационных решений, но и путем более качественного геологического обеспечения добывающих предприятий с акцентом на повышение точности и достоверности модельных представлений об осваиваемых объектах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батугин С. А., Черный Е. Д. Теоретические основы опробования и оценки запасов месторождений. — Новосибирск: Наука, 1998. — 344 с.
2. Троицкий В. В. Проблемы методического и юридического характера, связанные с пополнением запасов месторождений россыпного золота и их разработкой // Золотодобыча. — 2015. — № 8. URL: <https://zolotodb.ru/article/11307>.
3. Shurygin D. N., Vlasenko S. V., and Shutkova V. V. Estimation of the error in the calculation of mineral reserves taking into account the heterogeneity of the geological space, IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., Russky Island, 4–6 March 2019, Vol. 272.
4. Рогова Т. Б., Шаكليен С. В. Применение геоинформационных технологий при оценке запасов угольных месторождений Кузбасса // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2021. — № 1–6. — С. 47–53.
5. Викентьев В. А., Карпенко И. А., Шумилин М. В. Экспертиза подсчета запасов рудных месторождений. — М.: Недра, 1988. — 199 с.
6. Батугина Н. С., Гаврилов В. Л., Ткач С. М. Погрешность изменения прибыли горного предприятия при разработке сложноструктурного месторождения // Горн. журн. — 2018. — № 12. — С. 41–45.
7. Батугина Н. С., Гаврилов В. Л., Ткач С. М. Кластерная организация россыпных месторождений Якутии и использование ее особенностей в геотехнологиях // Горн. журн. — 2019. — № 2. — С. 16–19.
8. Ермаков С. А., Бураков А. М., Касанов И. С. Минимизация объемов переработки золотосодержащих песков россыпных месторождений Якутии по критерию предельной крупности некондиционного сырья // ГИАБ. — 2014. — № 4. — С. 138–149.
9. Батугин С. А., Яковлев В. Л. Закономерности развития горного дела. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. — 116 с.
10. Jones G. and O'Brien V. Aspects of resource estimation for mineral sands deposits, Trans. Inst. Min. Metall., Sect. B, 2014, Vol. 123. — P. 86–94.
11. Thomas Stephen W. and Wendt Clancy J. Placer sampling and reserve estimation, Applied mining geology: Ore reserve estimation, Symp. Meet. Soc. Min. Eng. AIME, 1986. — P. 169–174.
12. Tenorio V. O., Bandopadhyay S., Misra D., Naidu S., and Kelley J. Development of a methodology combining clustering and conditional simulation for the definition of underwater sampling models, Proc. 37<sup>th</sup> Int. Symp. APCOM–2015, Fairbanks, 23–27 May 2015. — P. 872–888.
13. Coombes J., Standing C., Lacourt R., and Queiroz C. Exposing uncertainty in schedules for proactive stockpile planning, Miner. Resour. Ore Reserve Estimation, 2014. — P. 619–626.
14. Гальцева Н. В., Горячев Н. А., Шарыпова О. А. Экономический потенциал освоения техногенных отходов горнодобывающих предприятий Северо-Востока России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2021. — № 1–6. — С. 68–74.

15. Крутоус В. И. Погребенные, сложные и ископаемые россыпи золота (Верховья р. Колыма) // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. — 2011. — № 1. — С. 27–40.
16. Мирзеханов Г. С., Мирзеханова З. Г. Оценочные критерии ресурсного потенциала техногенных образований россыпных месторождений золота Дальнего Востока России // Вестн. Камчатской региональной организации “Учебно-научный центр”. Сер.: Науки о Земле. — 2014. — № 1. — С. 139–150.
17. Deng H., Huang X., Mao X., Yu S., Chen J., Liu Z., and Zou Y. Generalized mathematical morphological method for 3d shape analysis of geological boundaries: application in identifying mineralization-associated shape features, Nat. Resour. Res., 2021. DOI: 10.1007/s11053-021-09975-6.
18. Zhang S. E., Nwaila G. T., and Tolmay L. Integration of machine learning algorithms with gompertz curves and kriging to estimate resources in gold deposits, Nat. Resour. Res., 2021, Vol. 30. — P. 39–56.
19. Мальцев Е. Н. Сравнение российской и зарубежной систем подсчета запасов твердых полезных ископаемых и практический опыт использования // Глобус. — 2022. — № 1. — С. 188–92.

*Поступила в редакцию 07/IV 2022*

*После доработки 18/IV 2022*

*Принята к публикации 06/V 2022*