

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ПОДРЕЗОВ Денис Рустамович

**Разработка и идентификация моделей оценки запасов рудника подземного
скважинного выщелачивания урана**

Специальность

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(промышленность)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
проф., д.т.н. Гончаренко С.Н.

Москва 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Задачи непрерывного поиска производственных резервов, факторов повышения эффективности, оптимизации расходов на добычу и расширение минерально-сырьевой базы горнодобывающего предприятия становятся как никогда актуальными в сложившихся на сегодняшний день негативных тенденциях на мировом рынке уранового сырья. Одним из путей сохранения своих позиций для предприятия является непрерывное развитие минерально-сырьевой базы месторождения и обеспечение необходимых объемов вскрытых и готовых к отработке запасов.

Однако, в сложившихся условиях рудник подземного скважинного выщелачивания столкнулся с несколько нестандартной проблемой, заключающейся в наличии на большинстве технологических блоков переизвлечения вскрытых запасов, зафиксированного как в настоящее время, так и ожидаемого по прогнозным экспертным расчетам.

Анализ такого состояния свидетельствует о наличии системной тенденции недооценки вскрытых запасов, приводящей к появлению аномально низких коэффициентов обеспеченности и завышению коэффициентов по вскрытию, что в свою очередь, влияет непосредственно на показатели проектного извлечения и уровень производственной себестоимости.

Проведенные исследования были направлены на выяснение закономерностей и основных причин несоответствия расчетных объемов вскрытых запасов фактической добыче, а также определение потенциальных возможностей укрепления минерально-сырьевой базы и повышение эффективности функционирования рудника подземного скважинного выщелачивания. В этой связи системный анализ производственных факторов, определяющих причины эксплуатационного переизвлечения урана и недооценки запасов на технологических блоках является одним из направлений поиска эффективных управленческих решений укрепления ресурсной базы предприятия и увеличения ее капитализации.

Таким образом, идентификация объемов вскрытых запасов на основе ретроспективного анализа геофизической информации на технологических блоках рудника подземного скважинного выщелачивания урана является актуальной научной и практической задачей.

Целью работы является повышение эффективности и интенсификация отработки технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания на основе выявления и анализа закономерностей несоответствия результатов геолого-разведочных работ на месторождении и показателей технологического вскрытия рудной залежи.

Идея работы заключается в получении достоверных сведений о запасах урана на технологических блоках рудника на основе разработанных методов и моделей переинтерпретации геофизических данных с изменением и коррекцией радиологических параметров морфологических элементов рудной залежи.

Новизна научных исследований заключается в следующем:

Установлены корреляционные зависимости между показателями вскрытых запасов на блоках месторождения, объемом горнорудной массы, извлечением металла, средней концентрацией металла в растворе и технологическими параметрами выщелачивающих растворов;

Проведен корреляционный анализ показателей бортовых кондиций и получены зависимости бортовой массовой доли радия на границах рудных интервалов от средней массовой доли радия для различных морфологических элементов рудной залежи;

Определены законы распределения горнорудной массы, запасов урана и мощностей рудных интервалов на технологических блоках месторождения, позволяющие определить структуру и соотношения параметров блоков, находящихся на определенной стадии отработки запасов;

Определены законы площадного распределения коэффициента радиоактивного равновесия для разведочных и технологических скважин с керновой аналитикой для различных морфологических элементов рудной залежи, позволяющие выявить значимые корреляционные зависимости данного

коэффициента от средней массовой доли радия и среднего значения мощности рудных интервалов;

Проведено формирование стохастической факторной системы геофизических данных, позволившей сформировать исходное множество оценочных критериев для подсчета запасов технологического блока и на основе экспертно-моделирующих процедур получить упорядоченную последовательность их значимости.

Задачи:

Теоретико-информационный анализ технологической схемы промышленной отработки запасов урана методом подземного скважинного выщелачивания;

Разработка информационной модели эксплуатации технологических скважин и формализация задачи управления основными показателями функционирования технологического блока;

Разработка методики идентификации вскрытых запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания, включающей:

- методы определения типов границ рудных интервалов, интерпретации и корректировки рудной мощности, оценки бортовых кондиций, группировки сближенных скважин;

- зависимости коэффициента радиоактивного равновесия от средней массовой доли радия, содержания металла в рудном интервале и расчет метропроцента;

- процедуру формирования исходного множества вариантов подсчета запасов технологического блока и оценочных критериев переинтерпретации геофизических данных;

- методы решения задачи выбора варианта расчета запасов по сформированной совокупности оценочных критериев;

- модели оценки показателей функционирования и переоценки запасов технологических блоков рудника;

– модель определения ресурсного потенциала и развития минерально-сырьевой базы месторождения.

Разработка проблемно-ориентированной системы управления показателями технологических процессов рудника подземного скважинного выщелачивания урана, позволяющей реализовать функции планирования добычи по технологическим блокам рудника и формирования производственной программы развития технологического полигона на основе полученных модельных вариантов вскрытых запасов.

Методы исследования включают системный, факторный и статистический анализ геофизических данных технологического полигона, теорию принятия решений, математическое моделирование показателей геотехнологий, теорию вероятностей, теоретико-информационный анализ деятельности горнопромышленного предприятия.

Научные положения:

Сформирована структура предпочтений оценочных критериев и решена многокритериальная задача выбора варианта расчета запасов, позволяющая определить показатели переоценки запасов технологических блоков рудника и ресурсный потенциал развития минерально-сырьевой базы месторождения.

Выявлены корреляционные взаимосвязи коэффициента радиоактивного равновесия для различных морфологических элементов рудной залежи от средней массовой доли радия, позволяющие осуществить процедуру переинтерпретации геофизических данных с изменением и коррекцией радиологических параметров содержания металла, величины рудного интервала и показателей бортовых кондиций.

Созданная методика идентификации вскрытых запасов показала, что определение причин переизвлечения металла при эксплуатационных работах и пересчет вскрытых запасов технологических блоков рудника необходимо осуществлять на основе разработанных методов, сформированных моделей и полученных регрессионных взаимосвязей в структуре геофизических данных для различных морфологических элементов рудной залежи.

Обоснованность и достоверность результатов исследования обеспечивается: репрезентативностью исходных статистических выборок геофизических и технологических данных; корректным использованием в обработке информации методов математической статистики и теории принятия решений; использованием современного программного обеспечения, оборудования и апробированных методик.

Научная и практическая значимость: разработана методика идентификации вскрытых запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания, которая, в отличие от существующих, в условиях неполноты геологической информации, позволяет повысить точность, надежность и качество интерпретации показателей освоения минерально-сырьевой базы на основе использования выявленных системных взаимосвязей в структуре показателей эволюции запасов месторождения.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Основные положения диссертации использованы в АО «Совместное предприятие «Акбастау» (Республика Казахстан) при создании методики идентификации и пересчета запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана и в АО «Казахстанско-российско-кыргызское совместное предприятие «Заречное» (Республика Казахстан) при разработке проблемно-ориентированной системы управления показателями технологических процессов рудника подземного скважинного выщелачивания, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на 4-й конференции Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (ноябрь, 2020 г.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 6 научных работах, в том числе в 4-х изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 153 наименований и представлена на 175 страницах, включая 48 рисунков, 44 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Многие предприятия урановой отрасли, ведущие отработку месторождений способом подземного скважинного выщелачивания сталкиваются с проблемой переизвлечения металла и как следствие - наличие несоответствия геологических и непосредственно вскрытых запасов на технологических добычных блоках. Такие несоответствия сопряжены, прежде всего, с результатами интерпретации геофизических данных, что затрудняет прогноз геолого-технологических показателей эксплуатационных объемов бурения скважин, расходов материалов, электроэнергии и реагентов на закисление и последующее выщелачивание. Анализ настоящего состояния вскрытых на сегодняшний день запасов на предприятии свидетельствует о том, что 43,8% технологических блоков, находящихся на начальной стадии отработки с объемами ниже среднего значения по месторождению демонстрируют извлечение более 90% (рисунок 1).

Анализ динамики изменения запасов месторождения за последние десять лет от начала учета добычи на блоках и по настоящее время, когда корректировки запасов уже завершены, позволяют увидеть, что с учетом прироста (+3189т (19,8%)), уроста (-732т (4,5%)) и коррекции запасов (2457т) в процессе эксплуатации технологических блоков, имеет место системное переизвлечение металла (более 90%) (рисунок 2).

Для определения основных причин возникновения системной недооценки запасов была исследована структура основных показателей стохастической факторной системы геофизических данных, под которой будем понимать совокупность факторных (множество геофизических и технологических данных) и результативных (объем запасов технологического блока) признаков, связанных между собой причинно-следственной связью вида $Q_z = \xi(F1, F2, F3)$, определяющих объем вскрытых запасов на месторождении.

Факторная группа F1 представляет собой совокупность геофизических данных, характеризующих интервал эффективной мощности закисляемого продуктивного горизонта и используемых для корректировки величины рудных интервалов, включаемых в подсчет запасов технологического блока.

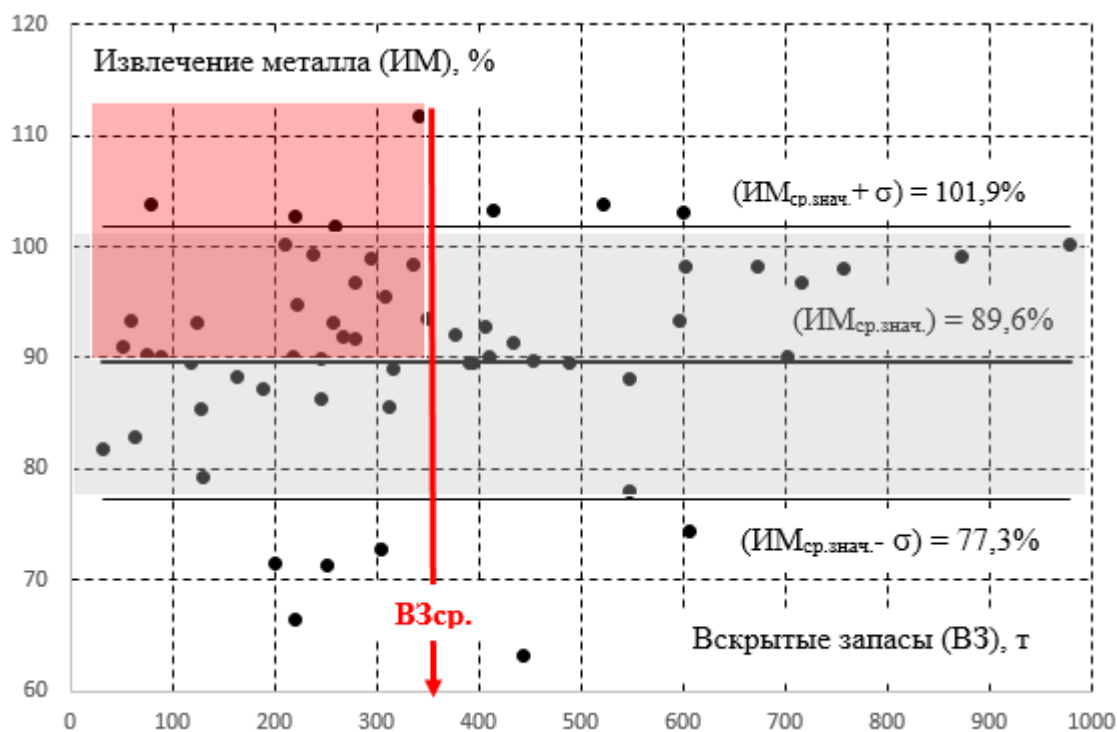


Рисунок 1 - Извлечение металла из вскрытых запасов технологических блоков месторождения

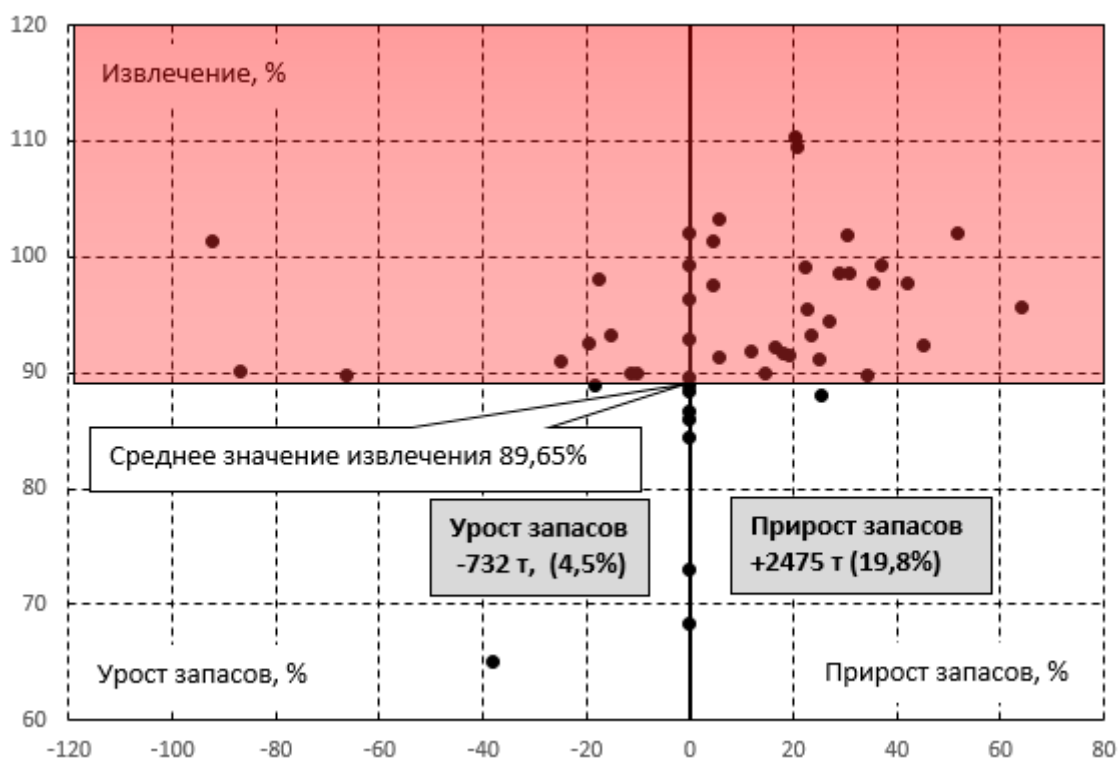


Рисунок 2 - Корректировка запасов и извлечения металла на технологических блоках месторождения

Факторная группа F2 содержит показатели и условия группировки технологических скважин блока, которые базируются на выявлении законов распределений метропроцента рудных интервалов в разрезе и по площади.

В факторную группу F3 входят показатели, используемые для коррекции контуров технологического блока, проведенных по проекциям фильтров граничных скважин для дальнейшего расчета его площади.

Учет данных трех факторов позволил реализовать процедуру пересчета запасов технологического блока на базе оценки эффективной мощности закисляемого продуктивного горизонта, группировок сближенных скважин и площади по проекциям фильтров. В качестве системы ограничений при решении задачи выбора варианта подсчета запасов выступают условия переинтерпретации геофизических данных морфологических элементов рудной залежи (мешки/крылья) и корректировка границ рудного интервала для сложноструктурных элементов рудной залежи. В этой связи, в общем виде задачу выбора варианта учета различных факторных признаков для оценки вскрытых запасов на месторождении можно сформулировать как многокритериальную (таблица 1). Одной из разновидностей решения задачи выбора может выступать расчет соответствующих метрик. Так в метрике R^2 определяется расстояние от «идеальной точки» - как правило, гипотетического варианта, имеющего наилучшие значения по множеству оценочных критериев до всех остальных векторов оценки (таблица 2). Проведенные расчеты показали, что оптимальные значения оценки запасов исходя из функции ценности и R^2 -метрики дает третий вариант.

Однако, результаты решения задачи выбора вариантов расчета запасов технологического блока показали, что полученные изменения функции ценности (объем запасов) незначительны и не превышают 10% относительно параметров технологического регламента предприятия (вариант 1), а среднее содержание урана практически неизменно.

Таблица 1 – Формирование исходного множества вариантов и совокупности оценочных критериев подсчета запасов технологического блока

Варианты пересчета запасов	Критерии оценки вариантов (прирост запасов, %, λ -значимость критерия)			
	Критерий оценки рудных интервалов в эффективной мощности	Критерий оценки группировок сближенных скважин	Критерий оценки площади по проекциям фильтров	Условие переинтерпретации геофизических данных и корректировки границ рудного интервала
Вариант 1	8% ($\lambda_{11}=0,57$)	6% ($\lambda_{12}=0,43$)	×	×
Вариант 2	8% ($\lambda_{21}=0,32$)	6% ($\lambda_{22}=0,24$)	11% ($\lambda_{23}=0,44$)	×
Вариант 3	8% ($\lambda_{31}=0,21$)	6% ($\lambda_{32}=0,16$)	11% ($\lambda_{33}=0,29$)	13% ($\lambda_{34}=0,34$)

Таблица 2 – Сравнительный анализ вариантов расчета запасов по сформированной совокупности оценочных критериев

Параметры технологического блока	Варианты подсчета запасов		
	1	2	3
Количество скважин в подсчете	71	71	71
Количество сгруппированных скважин	42	58	67
Эффективная мощность закисляемого продуктивного горизонта (M_3), м	14	14,6	14,2
Средняя рудная мощность (m), м	8,88	9,41	9,09
Среднее содержание урана в руде (с), %	0,1043	0,096	0,1002
Средняя продуктивность рудного тела (m_U), кг/м ²	15,48	15,78	16,45
Площадь блока ($S_{\text{бл.}}$), тыс. м ²	33350	35100	35800
Функция ценности (Объем запасов, (Q_3)), т	525	554	577
R^2 – метрика, $R_x^{(j)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i^{(j)} - x_c)^2}$	$R^2(1)$	$R^2(2)$	$R^2(3) = \min \{R^2(1), R^2(2), R^2(3)\}$

Это еще раз свидетельствует о том, что основная проблема переоценки запасов технологического блока заключается в обработке и анализе радиологических данных и в интерпретации на их основе объемных и качественных показателей расчета запасов урана на месторождении.

С этой целью определены геофизические методы и радиологические показатели на базе которых реализуется процедура оценки запасов технологического блока при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания. Среди основных методов необходимо выделить керновое

геологическое опробование (ГО), гамма-каротаж (ГК) и метод мгновенных нейтронов деления (КНД-М).

Для определения специфических особенностей применения каждого из вышеуказанных методов для оценки запасов в работе был проведен сравнительно-сопоставительный анализ качества и достоверности получаемых радиологических данных.

Одной из задач настоящей работы является оценка возможности применения результатов КНД-М для уточнения качества и надежности показателей, полученных при выполнении геологоразведочных работ.

Для решения задачи оценки достоверности КНД-М в сопоставлении с контрольным методом (геологическим опробованием) был проведен расчет данных с определением статистических характеристик достоверности (таблица 3). Приведенные в таблице результаты свидетельствуют о достоверности определения параметров рудных интервалов методом КНД-М, в связи с тем, что систематические расхождения в параметрах рудных интервалов отсутствуют, а случайные расхождения не превышают допустимые границы.

Таблица 3 – Оценка достоверности КНД-М в сопоставлении с контрольным методом (геологическим опробованием)

Показатели сопоставления	ГО			КНД-М		
	m, м	Mc, м%	C, %	m, м	Mc, м%	C, %
Количество интервалов- 38						
Сумма	122,20	11,4089		119,70	11,2493	
Среднее значение	3,22	0,3002	0,0934	3,150	0,2960	0,0940
Значение t – статистики			1,55	0,33	0,57	
Критическое значение $t_{кр}^{(1)}$ (при P=95%)			2,02	2,02	2,02	
Случайное расхождение по мощности (Sm), м			0,189			
Относительное случайное расхождение по метропроценту (Smc), % отн.				24,8		
Случайное расхождение по Cu (Sm), %					0,0244	
Относительные расхождения средних величин, %			-2,0	0,7	-1,4	

На следующем этапе произведен сравнительный анализ результатов ГК для всех технологических и разведочных скважин, по которым был выполнен каротаж

КНД-М. Полученные расчетные значения t-статистики гораздо выше критических: 1,96 - пороговое для 95% доверительной вероятности, тогда как расчетные составляют 8,17 для мощности и 4,12 для метропроцента (таблица 4).

Таблица 4 – Оценка достоверности КНД-М в сопоставлении с контрольным методом (гамма-каротаж)

Показатели сопоставления	ГО			КНД-М		
	m, м	Mc, м%	C, %	m, м	Mc, м%	C, %
Количество интервалов- 369						
Сумма	1053,4	76,97		1162	92,23	
Среднее значение	2,51	0,185	0,069	2,77	0,221	0,071
Значение t – статистики			8,17	4,12	1,81	
Критическое значение $t_{кр}^{(1)}$ (при P=95%)			1,96	1,96	1,96	
Случайное расхождение по мощности (Sm), м			0,33			
Относительное случайное расхождение по метропроценту (Smc), % отн.				25%		
Случайное расхождение по Cu (Sm), %					0,021	
Относительные расхождения средних величин, %			-9,3	-16,2	-2,5	

Анализ t-статистики показывает наличие статистически значимых расхождений в мощности рудных интервалов и в метропроценте между ГК и КНД-М. Так, по мощности имеет место занижение по результатам ГК на 9,3%, по метропроценту – на 16,2%. Сравнивая полученные результаты между ГК и КНД-М в технологических скважинах с результатами, полученными в разведочных скважинах между керновой аналитикой и ГК, мы видим сопоставимые цифры существенного занижения метропроцента урана.

Для исключения таких расхождений производилась корректировка искомой базы данных и формирование объединенной выборки, включающей данные по КНД-М, ГК и геологическому опробованию по всем геофизическим методам исследования.

При этом, специфической особенностью использования результатов геофизических методов для определения показателей мощности рудных интервалов и содержания в нем металла по объединенной выборке является то, что данные показатели оцениваются гамма-каротажом через определение уровня

сопряженного с ураном радия, используя коэффициент радиоактивного равновесия (K_{pp} - отношение стандартного количества радия к стандартному количеству урана в природных рудах).

Расчет статистических характеристик, определяющих точность и достоверность итоговой оценки средних значений K_{pp} для различных морфологических элементов рудной залежи (мешки и крылья) производится на базе статистического моделирования мощности и содержания металла в рудных интервалах. В основу модели положены тренды графиков бортовых кондиций $cRa_{cp}/cRa_{борт}$, которые были построены на основании определения зависимости бортовой массовой доли радия на границах рудных (по урану) интервалов от средней массовой доли радия для различных морфологических границ рудной залежи (рисунок 3).

Очевидно, что на границах бортовых кондиций мешковой и крыльевой части залежи зависимости, выражающее отношение среднего урана по бортовому содержанию 0,01% к среднему радия в рудном интервале, весьма устойчивы, изменяясь от 0,01 cRa_{cp} до 0,05. Точность аппроксимации достаточно велика и составляет 0,96 для крыльев и 0,99 для мешков соответственно. Таким образом, получаем следующие зависимости группировок $cRa_{cp} / cRa_{борт}$ по скорректированной базе данных в виде логарифмических трендов $cRa_{борт} = 0,0038 \ln(cRa_{cp}) + 0,0223$, $R^2 = 0,988$ (мешки); $cRa_{борт} = 0,0025 \ln(cRa_{cp}) + 0,0188$, $R^2 = 0,963$ (крылья), имеющих высокую степень достоверности. Соответственно, данные уравнения взаимосвязи $cRa_{борт} = f(cRa_{cp})$ целесообразно использовать для расчета границ рудных интервалов.

Полученные результаты позволили провести статистическое моделирование содержаний металла и определить диапазоны коррекции мощности рудных интервалов для различных морфологических границ на основе определения трендов графиков бортовых кондиций.

На следующем этапе исследования было проведено статистическое моделирование коэффициента радиоактивного равновесия от среднего содержания радия для определения искомого содержания урана в рудном интервале (рисунок 4).

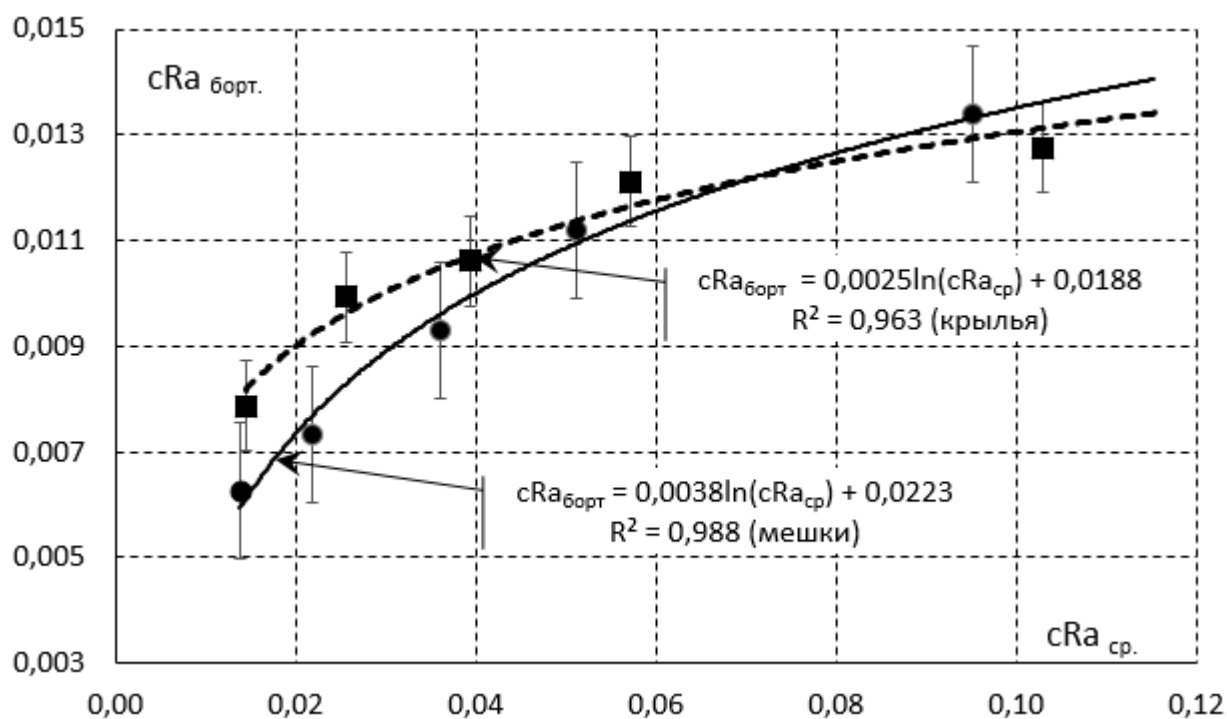


Рисунок 3 – Зависимости бортовой массовой доли радия на границах рудных (по урану) интервалов от средней массовой доли радия $cRa_{\text{ср}} / cRa_{\text{борт}}$ для мешков и крыльев

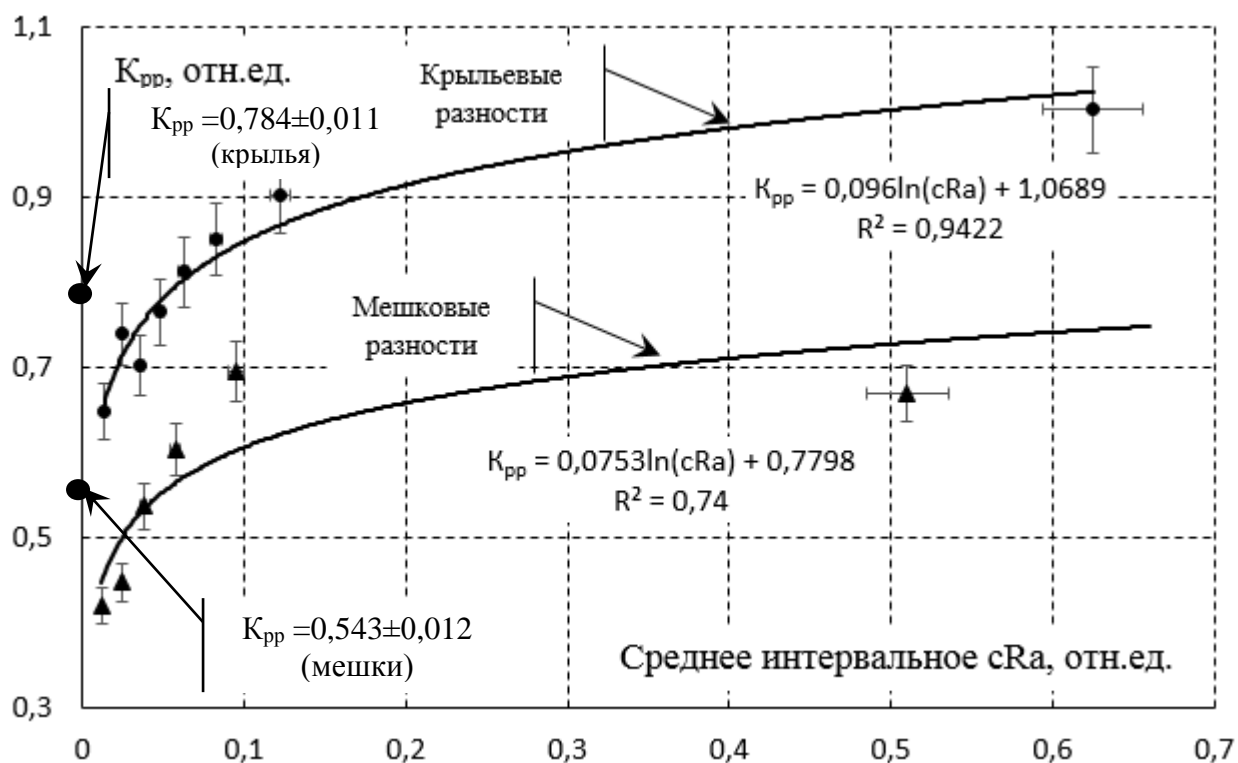


Рисунок 4 – Зависимость K_{pp} от среднего содержания радия (по данным объединенной статистической базы)

Таким образом, объединенные выборки, представляющие из себя полную базу данных по K_{pp} , полученных различными методами (ГО, ГК и КНД-М) представительны, однородны как по критерию Смирнова, так и по СКО. Среднее значение K_{pp} для выборки мешков составляет $0,543 \pm 0,012$, для выборки крыльев: $0,784 \pm 0,011$. Относительная погрешность определения среднего K_{pp} (для $P=95\%$) составляет 3,99 % для мешков и 2,98 % для крыльев. Рекомендованное значение относительной погрешности для достоверно определенной средней оценки K_{pp} составляет 5%. Полученные характеристики соответствуют основным инструктивным требованиям Инструкции по гамма-каротажу в части точности определения средней оценки K_{pp} и требованиям к выборкам, предназначенным для определения средних оценок K_{pp} .

Кроме того, полученные регрессионные взаимосвязи для оценки K_{pp} по геофизическим данным позволили существенно поднять представительность выборок и точность оценки K_{pp} для мешков и крыльев.

Полученные зависимости будут использоваться как один из вариантов расчета рудных интервалов при подсчете запасов технологического блока, а проведенные исследования позволяют сделать вывод, что радиологические поправки нуждаются в корректировке.

Данный подход позволил для всех блоков с извлечением выше 100%, либо с аномальным темпом извлечения, проверить качество и надежность интерпретации мощностей рудных интервалов и определить области, нуждающиеся в корректировке. Рудные интервалы определяются по кривой соотношения $cRa_{cp}/cRa_{борт}$. Выверяется мощность рудных интервалов путем проверки подсчитанного среднего содержания Ra в верхнем и нижнем контакте рудного интервала. Определение K_{pp} происходит по статистической зависимости отдельно для различных элементов рудной залежи (мешков и крыльев). В зависимости от полученного значения K_{pp} рассчитывается среднее значение мощностей рудных интервалов и средневзвешенные содержания урана, а затем считается удельная продуктивность, и, наконец, производится окончательный расчет запасов технологического блока рудника подземного скважинного выщелачивания.

Применение уточненных средних оценок K_{pp} позволяет в большинстве случаев заметно увеличить запасы технологических блоков при правильном выделении основных рудоформирующих морфологических элементов (мешков и крыльев). При этом, было выявлено, что на блоках с реально подтвержденным переизвлечением урана даже применение уточненных средних оценок K_{pp} для мешков и крыльев оказывается недостаточным для объяснения значительного переизвлечения. Основными причинами этого могут быть два фактора: наличие на месторождении участков (зон) богатых руд с аномально низкими средними значениями K_{pp} ; вовлечение в процесс выщелачивания рудных интервалов, которые были отнесены к технологическому забалансу по проницаемости (маломощные (0,2-0,4 м) рудные интервалы с богатыми рудами). Такие рудные интервалы могут являться одним из дополнительных источников извлечения урана из недр. На основании данной гипотезы была проведена оценка прироста запасов за счет вовлечения таких рудных интервалов в процесс скважинного подземного выщелачивания для выборок мешков и крыльев (таблица 5).

Таблица 5 – Статистические характеристики выборки для оценки средних значений K_{pp} в блоках с переизвлечением урана

Статистическая характеристика	Для мешков	Для крыльев
Объем выборки (количество рудных интервалов), ед.	39	16
Среднее значение K_{pp} , отн. ед.	0,49	0,77
СКО для K_{pp} , отн. ед.	0,20	0,24
Погрешность среднего K_{pp} , отн. ед.	0,033	0,060
Относительная погрешность определения среднего K_{pp} (для $P=95\%$), % отн.	13,4	15,9
Расчетное значение критерия Смирнова	2,76	1,87
Критическое значение статистики Смирнова для $P=95\%$	3,06	2,67
Расчетное значение V-статистики	2,68	0,15
Критическое значение V-статистики для $P=95\%$	1,96	1,96

Обе выборки для блоков с переизвлечением представительны и однородны как по критерию Смирнова, так и по СКО. Среднее значение K_{pp} для выборки мешков составляет $0,49 \pm 0,033$, причем, это существенно ниже, чем оценка K_{pp} полученная по полной базе данных K_{pp} для всего месторождения ($0,543 \pm 0,012$), и по V-статистике это расхождение не может быть признано случайным. Для

крыльев оценки средних значений K_{pp} практически совпадают, так как по выборке для блоков с переизвлечением K_{pp} составляет $0,77 \pm 0,060$, а для полной выборки $0,784 \pm 0,011$ и по V-статистике эти расхождения признаются случайными.

Таким образом, можно с достаточной степенью уверенности утверждать, что одной из причин недооценки запасов урана в исследованных блоках с реально подтвержденным переизвлечением урана являются существенно более низкие значения K_{pp} в мешковых частях. А учитывая, что основная часть запасов в этих блоках сосредоточена именно в мешках, занижение запасов по ГК за счет этого фактора может составлять не менее 10-15%.

Обобщенные результаты проведенных исследований легли в основу создания методики идентификации вскрытых запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана (таблица 6).

Реализация процедур пересчета уровня радия и определения содержания урана в рудном интервале, а также пересчета K_{pp} и определения мощности рудного интервала и метропроцента, позволяют осуществить окончательный расчет прироста запасов технологического блока рудника подземного скважинного выщелачивания урана с учетом данных статистики блоков с выявленным переизвлечением на основе полученных зависимостей K_{pp} от cRa для мешков: $K_{pp} = 0,0753 \ln(cRa) + 0,7798$, $R^2 = 0,74$, при $cRa < 0,1\%$; $K_{pp}=0,7$, при $cRa \geq 0,1\%$. K_{pp} для крыльев принимается в виде регрессионной зависимости от cRa вида: $K_{pp} = 0,096 \ln(cRa) + 1,0689$, $R^2 = 0,9422$, при $cRa < 0,12\%$; $K_{pp}=0,96$, при $cRa \geq 0,12\%$. Следует отметить, что применение данных зависимостей позволяет рассчитывать рудные интервалы с параметрами, определяющими запасы блоков, более адекватными по извлечению, нежели запасы, оцененные предприятием.

Ориентируясь на такие условия, смоделированы основные параметры подсчета запасов технологических блоков (таблица 7).

Таким образом, в результате моделирования были получены значения прироста (относительно расчетных данных предприятия при фиксированных значениях K_{pp}) вскрытых запасов (3804 т), что на 15,6% больше, чем по первоначальным оценкам предприятия (рисунок 5).

Таблица 6 – Основные этапы методики идентификации вскрытых запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана

1. Выявление технологических блоков с извлечением выше 100%, либо с аномальным темпом извлечения металла
2. Статистический анализ и интерпретация мощностей рудных интервалов
2.1. Выделение непроницаемых разностей и определение количества и параметров интервалов непроницаемых горных пород
2.2. Определение регрессионной взаимосвязи показателей бортовых кондиций и выделение собственно рудных интервалов по полученной регрессионной зависимости соотношения $cRa_{cp}/cRa_{борт.}$ в пределах скорректированных отрезков глубин
3. Определение типов границ рудного интервала с учетом формы кривой гамма-каротажа (мешки/крылья)
4. Статистическое определение мощности рудных интервалов по подсчитанному среднему содержанию радия в верхнем и нижнем контакте рудного интервала
5. Определение регрессионной зависимости коэффициента радиоактивного равновесия от средней массовой доли радия, содержания металла в рудном интервале и расчет метропроцента
6. Формирование исходного множества вариантов подсчета запасов технологического блока и совокупности оценочных критериев переинтерпретации геофизических данных
6.1. Расчет вариантов коэффициентов радиоактивного равновесия (K_{pp}): « K_{pp} 0,543-0,784» (по объединенной БД), « K_{pp} 0,49-0,76» (блоки с переизвлечением), K_{pp} статистической регрессионной зависимости отдельно для мешков и крыльев
6.2. Расчет интервалов рудной мощности в эффективной мощности с учетом комплекса условий и ограничений.
6.3. Расчет средних значение мощностей рудных интервалов и средневзвешенных содержаний урана по трем вариантам K_{pp}
7. Решение задачи выбора варианта расчета запасов по сформированной совокупности оценочных критериев
8. Реализация процедуры переоценки запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания
9. Моделирование показателей функционирования технологических блоков рудника и оценка ресурсного потенциала развития минерально-сырьевой базы месторождения

Таблица 7 – Сводная таблица результатов моделирования переоценки запасов технологических блоков (фрагмент)

Номер блока	ГРМ, т	Факт добычи, т	Вскрытые запасы технологического блока			
			Оценка предприятия при K_{pp} [0,58; 0,75]	Переоценка при K_{pp} [0,543;0,784]	Переоценка при K_{pp} [0,49; 0,77]	Переоценка по результатам моделирования
1	1227	514	606	869	1002	821
2	963	359	590	788	882	759
3	984	228	426	570	653	560
...
65	1140	235	409	498	498	498
66	1533	184	327	365	414	391
Всего		22291	24409	27904	30944	28213
Соотношение			100%	114,3%	126,8%	115,6%

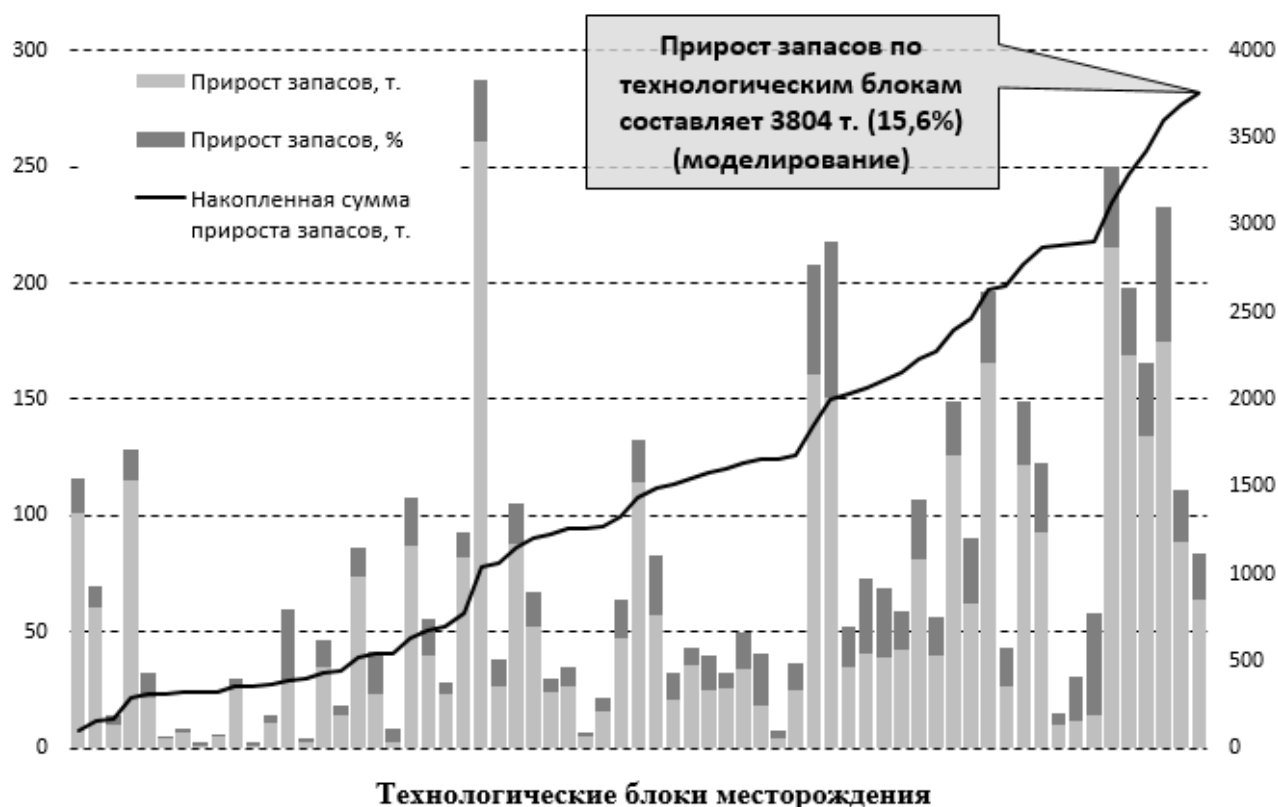


Рисунок 5 – Результаты моделирования прироста запасов технологических блоков месторождения

При этом среднее и стандартное отклонение извлечения урана составляет $78,54 \pm 13,3\%$, а максимальное значение по модели не превышает $91,3\%$ (рисунок 6). Проведенный по результатам моделирования анализ соотношения горнорудной массы и вскрытых запасов месторождения позволил получить значимую регрессионную взаимосвязь между соотношениями данных показателей (рисунок 7).

Было выявлено, что 68% всех технологических блоков отработаны не более чем на 60% с вскрытыми запасами, не превышающими 600 т. Это соотношение еще раз подтверждает наличие значительного ресурсного потенциала в освоении минерально-сырьевой базы месторождения урана, отрабатываемого способом подземного скважинного выщелачивания.

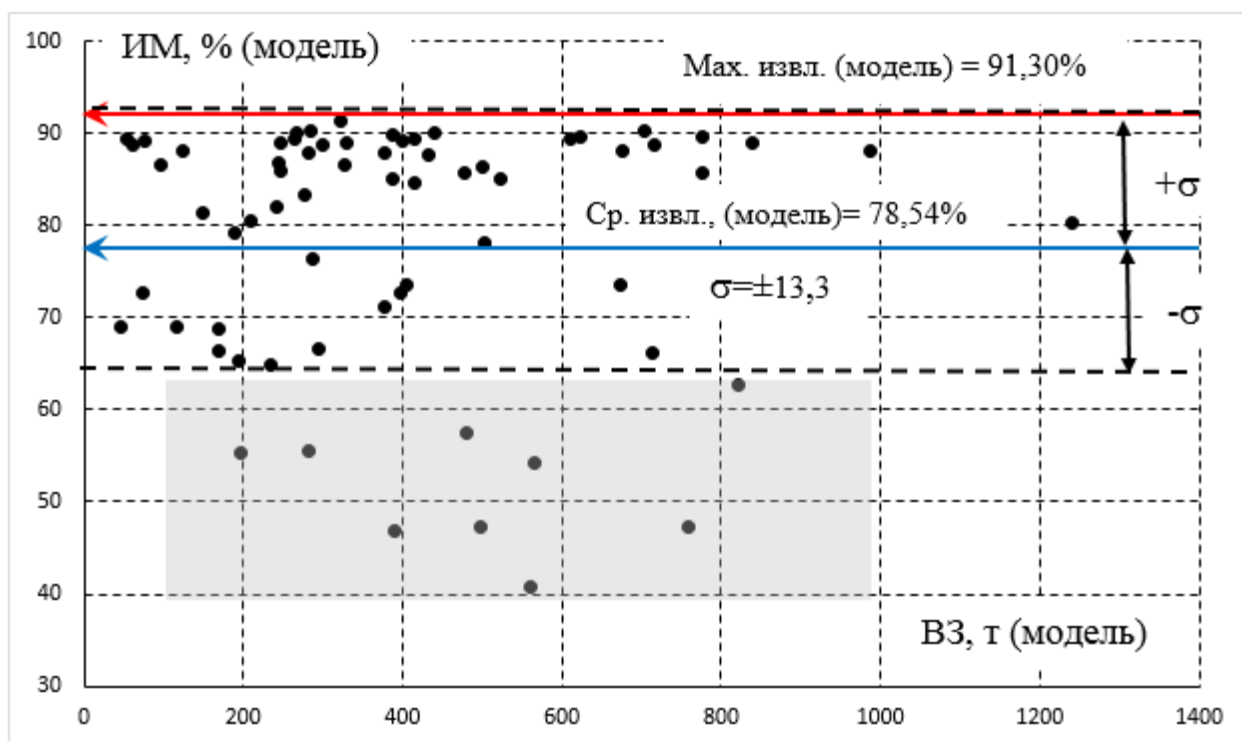


Рисунок 6 – Извлечение металла (ИМ, %) из вскрытых запасов (ВЗ, т) по технологическим блокам месторождения по результатам моделирования (среднее значение извлечения металла ($ИМ_{ср.знач} = 78,54\%$), стандартное отклонение для извлечения металла составляет ($\sigma = \pm 13,3\%$), $ИМ_{max} = 91,3\%$)

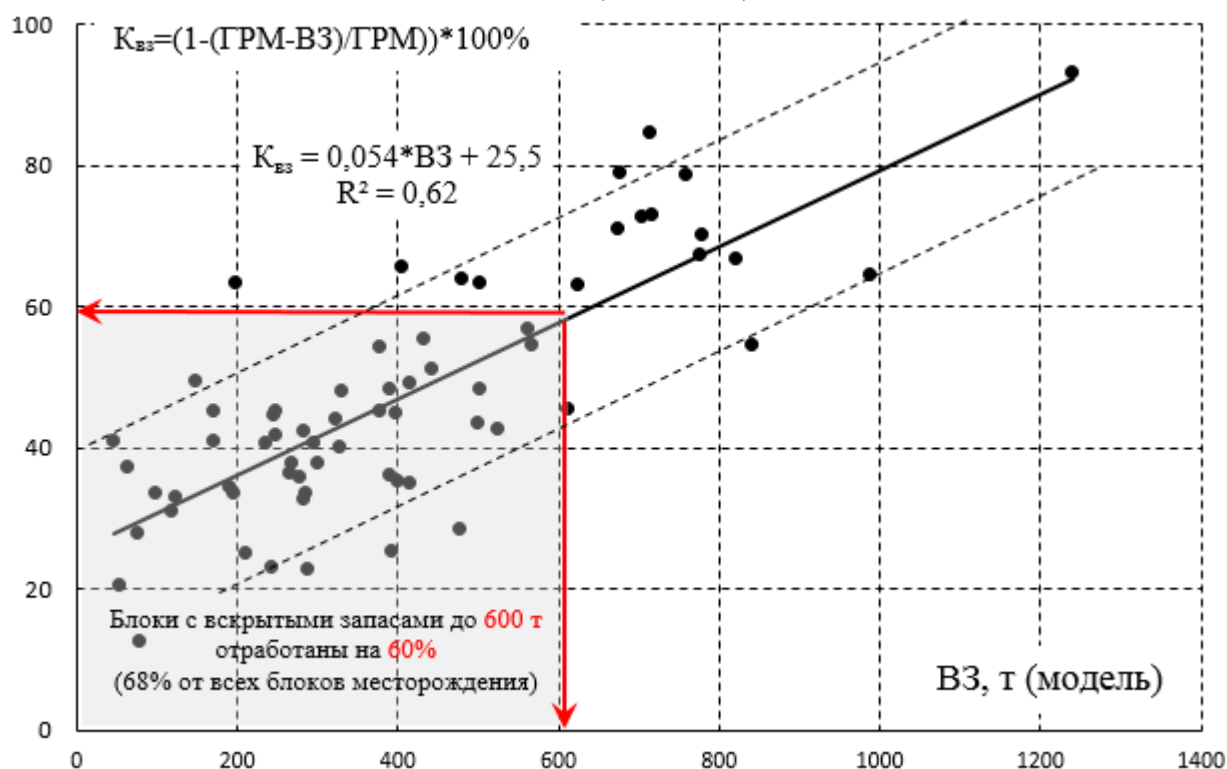


Рисунок 7 – Ресурсный потенциал месторождения по данным моделирования вскрытых запасов (ВЗ) технологических блоков ($K_{вз}$ – коэффициент отработки вскрытых запасов)

Таким образом, выполненные исследования позволяют получить новые результаты переоценки ресурсного потенциала технологического блока с одновременным обоснованным прогнозом остаточных запасов урана в эксплуатируемых и вскрываемых блоках; снизить затраты на бурение на стадии горно-подготовительных работ за счет изменения сетки скважин и использования более редкой сети вскрытия; снизить потребность в электроэнергии за счет снижения количества единиц скважинного насосного оборудования, оптимизировать количество серной кислоты и в целом повысить качество прогнозирования и планирования производственных показателей для обеспечения успешного выполнения производственной программы добычи урана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научная и практическая задача, заключающаяся в разработке методов и моделей идентификации объемов вскрытых запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана на основе ретроспективного анализа геофизической информации.

Основные выводы и рекомендации, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Проведен теоретико-информационный анализ технологической схемы промышленной отработки запасов урана способом подземного скважинного выщелачивания и установлены корреляционные зависимости между показателями вскрытых запасов на блоках месторождения, объемом горнорудной массы, извлечением металла, средней концентрацией металла в растворе и технологическими параметрами выщелачивающих растворов.

2. Сформирована информационная модель эксплуатации технологических скважин и проведен корреляционный анализ показателей бортовых кондиций, позволивший получить зависимости бортовой массовой доли радия на границах рудных интервалов от средней массовой доли радия для различных морфологических элементов рудной залежи.

3. Определены законы распределения горнорудной массы, запасов урана и мощностей рудных интервалов на технологических блоках месторождения, позволяющие определить структуру и соотношения параметров блоков, находящихся на определенной стадии отработки запасов.

4. Определены законы площадного распределения коэффициента радиоактивного равновесия для разведочных и технологических скважин с керновой аналитикой для различных морфологических элементов рудной залежи, позволяющие выявить значимые корреляционные зависимости данного коэффициента от средней массовой доли радия и среднего значения мощности рудных интервалов.

5. Проведено формирование стохастической факторной системы геофизических данных, позволившей сформировать исходное множество оценочных критериев для подсчета запасов технологического блока и на основе экспертно-моделирующих процедур получить упорядоченную последовательность их значимости.

6. Решена задача выбора и проведен сравнительный анализ вариантов расчета запасов по сформированной совокупности оценочных критериев;

7. Произведено моделирование показателей функционирования и переоценки запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана, позволяющее определить ресурсный потенциал месторождения в целом.

8. Разработана проблемно-ориентированная система управления показателями технологических процессов рудника подземного скважинного выщелачивания урана, позволяющая реализовать функции планирования добычи по технологическим блокам рудника и формирования производственной программы развития технологического полигона на основе полученных модельных вариантов вскрытых запасов.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих опубликованных работах.

В перечне, рекомендованном ВАК Минобрнауки России:

1. **Подрезов Д.Р.** Анализ системных связей показателей функционирования технологического блока и решение задачи выбора вариантов подсчета запасов на основе геофизических данных / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки" – 2020. – №2.– С.34-42. DOI:10.21685/2072-3059-2020-2-4.
2. **Подрезов Д.Р.** Методы и модели идентификации запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана /Прикаспийский журнал. Управление и высокие технологии. – 2020. –№2. – С. 32-43. DOI 10.21672/2074-1707.2020.50.2.032-043.
3. **Подрезов Д.Р.** Разработка проблемно-ориентированной системы управления показателями технологических процессов рудника подземного скважинного выщелачивания урана /Программные продукты и системы. – 2020. – Т33.– №3. – С. 530-537. DOI: 10.15827/0236-235X.131.561-566.
4. **Подрезов Д.Р.** Моделирование показателей функционирования геотехнологических блоков и движения вскрытых запасов рудника подземного скважинного выщелачивания урана. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.– 2020. – 47(2). – С. 98-107. DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-2-98-107.

В других изданиях:

5. **Подрезов Д.Р.** Задачи совершенствования управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана. Горные науки и технологии. – 2020. –5(2). –С.131-153. URL: <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>.
6. **Подрезов Д.Р.** Формирование стохастической факторной модели геофизических данных на руднике подземного скважинного выщелачивания урана. //В сб.: 4-й конференции Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр». - М.: ИПКОН РАН.– 2020. – С. 296-299.