

12. NTechLab. Available at: <https://ntechlab.ru/> (accessed 09.03.2020).
13. Iqbal U. and Gall J. Multi-person pose estimation with local joint-to-person associations. *ECCV Workshops, Crowd Understanding*. 2016. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1608.08526.pdf>.
14. Watcom. Available at: [https://www.watcom.ru/products/sistema\\_podscheta\\_posetiteley/?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=%7Bcampaign\\_id%7D&utm\\_content=%7Bad\\_id%7D&utm\\_term=%2Bвидеокамера%20%2Bподсчет%20%2Bпосетителей&gclid=Cj0KCQjwIv0BRDaARIsAGTWD1uK7s0Zfcft\\_HJ2Wzp\\_NaLnp77xNvvaCKQcXzL4grFqpR0RZTJaO40aAuU7EALw\\_wcB](https://www.watcom.ru/products/sistema_podscheta_posetiteley/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=%7Bcampaign_id%7D&utm_content=%7Bad_id%7D&utm_term=%2Bвидеокамера%20%2Bподсчет%20%2Bпосетителей&gclid=Cj0KCQjwIv0BRDaARIsAGTWD1uK7s0Zfcft_HJ2Wzp_NaLnp77xNvvaCKQcXzL4grFqpR0RZTJaO40aAuU7EALw_wcB) (accessed 31.03.2020).
15. Zhe Cao (2017). Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields. *Robotics Institute Carnegie Mellon University*. Pittsburgh, Pennsylvania, 2017. Available at: <http://www.ri.cmu.edu/wp-content/uploads/2017/04/thesis.pdf>.

DOI 10.21672/2074-1707.2020.50.2.032-043

УДК 004.94

## МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАПАСОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БЛОКОВ РУДНИКА ПОДЗЕМНОГО СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

*Статья поступила в редакцию 01.05.2020, в окончательном варианте – 05.06.2020.*

**Подрезов Денис Рустамович**, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский проспект, 4, соискатель, e-mail: [dpodrezov81@rambler.ru](mailto:dpodrezov81@rambler.ru)

Содержания урана в пластово-инфильтрационных месторождениях достаточно низкое и составляет десятки и сотые доли процента. Такой тип месторождений целесообразно разрабатывать без извлечения руды на поверхность. Одним из эффективных способов добычи урана в таких месторождениях является подземное скважинное выщелачивание. Многие предприятия урановой отрасли, ведущие отработку месторождений данным способом, сталкиваются с проблемой несоответствия геологических и непосредственно вскрытых запасов металла на технологических добычных блоках. Такие несоответствия связаны прежде всего с результатами интерпретации геофизических данных. В свою очередь это затрудняет прогноз геолого-технологических параметров эксплуатационных объемов бурения скважин при вводе блоков в эксплуатацию; расходов материалов и реагентов на закисление и последующее выщелачивание. В работе проведен сравнительный анализ геофизических методов оценки запасов технологического блока рудника подземного скважинного выщелачивания урана. Рассмотрены методы ядерного геологического опробования и специфические геофизические методы определения параметров геологических запасов урановых руд, такие как гамма-каротаж и метод мгновенных нейтронов деления. Для данных методов определены специфические особенности статистической интерпретации получаемых данных и обоснованы причины систематических и случайных (по статистическим критериям) расхождений в параметрах рудных интервалов для различных классов руд и морфологических элементов рудной залежи. Установлено, что качество результатов каротажа удовлетворительное, а сами результаты обладают высокой степенью достоверности и могут быть использованы для количественной оценки коэффициента радиоактивного равновесия рудных интервалов. Показаны возможности формирования по статистической базе данных разведочных и технологических скважин регрессионных взаимосвязей коэффициента радиоактивного равновесия от среднего содержания радия в рудном интервале; определения на этой основе численных значений параметров рудных интервалов для мешковых и крыльевых элементов рудной залежи. Полученные результаты позволили провести статистическое моделирование и определить диапазоны коррекции мощности рудных интервалов для различных морфологических границ на основе выявления трендов графиков бортовых кондиций.

**Ключевые слова:** идентификация запасов, регрессионные взаимосвязи коэффициента радиоактивного равновесия, статистическое моделирование рудных интервалов, прирост запасов, ресурсный потенциал месторождения

## METHODS AND MODELS OF IDENTIFICATION OF RESERVES OF TECHNOLOGICAL UNITS OF URANIUM WELL LEACHING MINE

*The article was received by the editorial board on 01.05.2020, in the final version – 05.06.2020.*

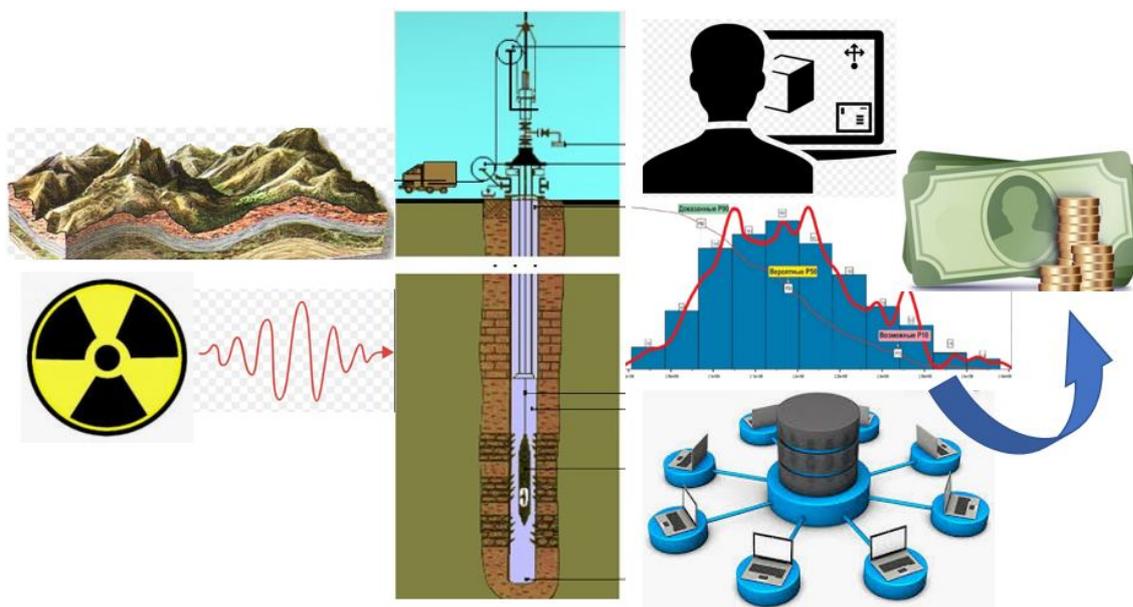
**Podrezov Denis R.**, National University of Science and Technological “MISiS”, 4 Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation, applicant, e-mail: [dpodrezov81@rambler.ru](mailto:dpodrezov81@rambler.ru)

Uranium content in formation and infiltration deposits is rather low and amounts to tenths and hundreds percent. This deposit type is advantageous to develop without extracting ore to the surface. One effective way to extract uranium in such fields is underground well leaching. Many uranium industry enterprises working in this way are faced with the geological mismatch problem and directly exposed metal reserves on process mining blocks. Such inconsistencies are primarily related to the geophysical data interpretation results. In turn, this makes it difficult to predict geological and technological parameters well drilling operational volumes during the units commissioning; materials consumption and

reagents for acidification and subsequent leaching. The work carried out a comparative analysis of underground well leaching uranium mine technological unit reserves estimating geophysical methods. Core geological testing methods and uranium ores geological reserves determining parameters specific geophysical methods, such as gamma logging and instantaneous fission neutrons method are considered. Obtained data statistical interpretation specific features are defined for these methods and systematic reasons and random (according to statistical criteria) discrepancies in ore intervals parameters for different ores classes and ore deposit morphological elements are justified. It has been found that the logging results quality is satisfactory and the results are highly reliable and can be used to quantify the ore intervals radioactive equilibrium coefficient. Themselves formation possibilities regression radioactive equilibrium coefficient relationships from radium average content in ore interval and ore intervals parameters numerical values determination for bag and ore deposit wing elements on this basis are shown according to statistical exploration database and technological wells. The obtained results made it possible to carry out statistical modeling and to determine ore intervals power correction ranges for different morphological boundaries on the on-board conditions graphs trends determination basis.

**Keywords:** inventory identification; radioactive equilibrium coefficient regression relationships; ore intervals statistical modeling; reserves increase, the deposit resource potential

**Graphical annotation (Графическая аннотация)**



**Введение.** Урановые месторождения, пригодные для отработки методом подземного выщелачивания, относятся к экзогенным (образованным поверхностными процессами при участии воздуха, поверхностных или грунтовых вод) пластово-инфильтрационным (образовавшимся в результате отложения рудных веществ из водных растворов) месторождениям. Содержание урана в рудных телах в среднем 0,07–0,08 %, глубина залегания – от 300 до 700 м. Основные запасы локализируются в высокопроницаемых песчаных и гравийно-песчаных отложениях. Рудовмещающие водоносные горизонты обычно ограничены достаточно выдержанными по площади и мощности водупорами. Такие геологические условия предопределяют выбор экономически эффективного способа отработки таких типов месторождений – подземное скважинное выщелачивание. Однако технологико-экономические вопросы разработки таких месторождений в литературе исследованы слабо. Поэтому целью данной работы является попытка устранить указанный недостаток.

**Общая характеристика предметной области.** Процесс добыча урана состоит из следующих составляющих: подземное скважинное выщелачивания урана (ПСВУ) сернокислотными растворами на геотехнологическом полигоне скважин (ГТП); насосный раствороподъём продуктивных растворов из откачных скважин; сбор продуктивных растворов в технологических узлах приёма (УППР); транспортировка урансодержащих растворов по сборному коллектору в пескоотстойники продуктивных растворов (ПР) основной промышленной площадки рудника ПСВ; подкисление возвратных растворов в технологических узлах приготовления выщелачивающих растворов (УПВР) серной кислотой, подаваемой с расположенного на промышленной площадке рудника ПСВ склада; подача рабочих (выщелачивающих) растворов в закачные скважины добычных полигонов через узлы распределения (УРВР) (рис. 1–2).



Рисунок 1– Укрупнённая технологическая схема промышленной отработки запасов урана на месторождении

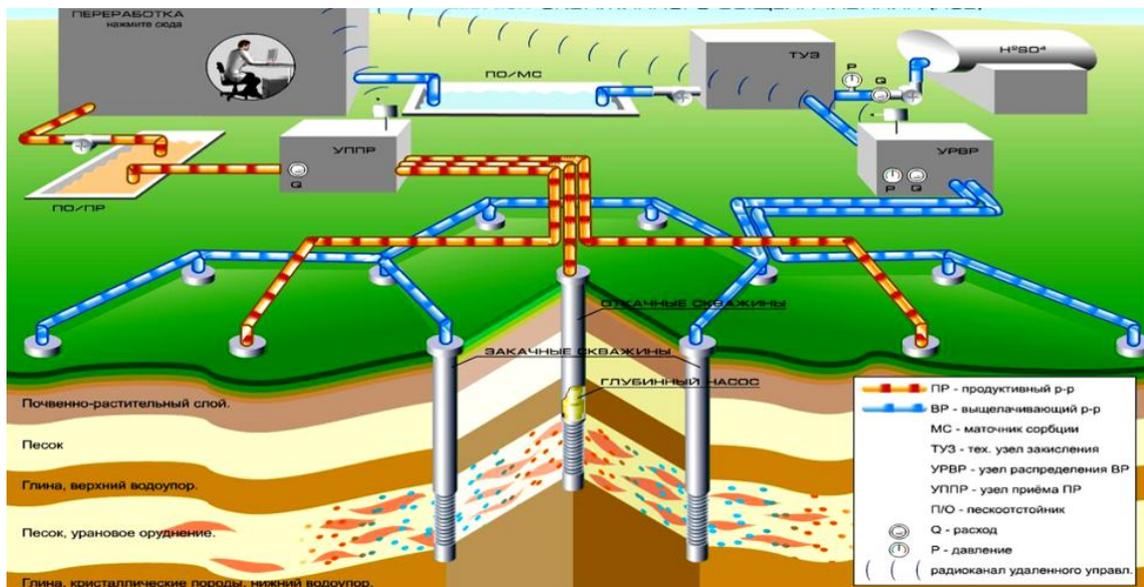


Рисунок 2 – Схема добычи урана способом подземного скважинного выщелачивания

**Характеристика материалов исследования.** Непосредственный подсчет вскрытых запасов на месторождении осуществляется исходя из следующих групп показателей: интервал эффективной мощности закисляемого продуктивного горизонта; показатели группировки технологических скважин; площадь технологического блока.

Использование геофизических методов для определения вышеуказанных показателей сопряжено с рядом специфических особенностей. При оценке мощности рудных интервалов и содержания в них металла на первом этапе определяют уровень сопряженного с ураном радия. Затем через коэффициент радиоактивного равновесия ( $K_{pp}$ ) (отношение стандартного количества радия к стандартному количеству урана в природных рудах) производят пересчет искомых параметров.

Неоднородность морфологических элементов залежи приводит к значительным погрешностям в интерпретации геофизических данных и, как следствие, неточностям оценки вскрытых запасов металла на месторождении. Кроме того, возникают трудности в адекватном экономическом планировании и бюджетировании основных технико-экономических показателей отработки месторождения. В итоге в оперативном плане вышеперечисленные факторы могут стать причиной неадекватного снижения содержания урана в продуктивных растворах и, как следствие, падения объемов добычи; наличия проблем с выполнением производственных обязательств [2, 3].

Выявление причин и ведущих факторов системной недооценки запасов технологических блоков позволит уменьшить затраты на сооружение скважин путем реализации проектов подготовки месторождений с более редкой сетью скважин, используемых для вскрытия пласта. Данный показатель позволит оценить перспективность вовлечения в добычу остаточных рудных интервалов и/или скоплений захороненных растворов. Это повлечет за собой улучшение состояния минерально-сырьевой базы предприятия с соответствующим ростом капитализации компании.

Ниже мы рассмотрим данный спектр проблем, являющихся типовыми для пластово-инфильтрационных месторождений уранодобывающей отрасли промышленности на примере одного из крупных горнодобывающих предприятий. Оно обрабатывает месторождение урана способом подземного скважинного выщелачивания на юге Казахстана. На первом этапе исследования на уранодобывающем предприятии был проведен первичный анализ показателей вскрытия технологических блоков и выявлены перспективные рудные тела; намечены планы по их отработке и приросту запасов с применением существующей инфраструктуры [1].

**Предлагаемые методы.** Для определения показателей оценки запасов технологического блока при добыче методом ПСВУ используется несколько методов. Среди них необходимо выделить ядерное геологическое опробование (ГО), гамма-каротаж (ГК), метод мгновенных нейтронов деления (КНД-М) [5, 6].

Полученные и оцифрованные данные сводятся в единую базу для подсчета запасов. Она содержит следующие показатели: эффективная мощность закисляемого продуктивного горизонта ( $M_3, м$ ); средняя рудная мощность ( $m, м$ ); среднее содержание урана в руде ( $c, \%$ ); средняя продуктивность рудного тела ( $m_U, кг/м^2$ ); площадь технологического блока ( $S_{бл}, тыс. м^2$ ); объем вскрытых запасов технологического блока ( $Q_3, т$ ).

Для определения специфических особенностей применения каждого из вышеуказанных методов с целью оценки запасов в данной статье представлены материалы сравнительно-сопоставительного анализа подходов, алгоритмов, а также качества и достоверности получаемых результатов.

Одной из задач настоящей работы является оценка возможности применения результатов КНД-М (каротаж методом мгновенных нейтронов деления) для уточнения качества и надежности коэффициента радиоактивного равновесия ( $K_{pp}$ ), полученного при выполнении разведочных работ, и оценки полученных зависимостей  $K_{pp}$  от содержания радия в рудном интервале (РИ). Для решения данной задачи была выполнена оценка качества результатов каротажа КНД-М согласно основным положениям Инструкции [6] при ведении разведочных и горно-подготовительных работ.

**Результаты и их обсуждение.** Достоверность каротажа КНД-М может быть оценена сопоставлением с результатами определения параметров РИ по контрольному методу геологического опробования. Для решения задачи оценки достоверности КНД-М в сопоставлении с контрольным методом (геологическим опробованием) был проведен расчет данных с определением статистических характеристик достоверности результатов КНД-М по отношению к контрольному методу (ГО) (табл. 1). Приведенные в таблице результаты свидетельствуют о достоверности определения параметров РИ методом КНД-М: систематические расхождения в параметрах РИ отсутствуют, случайные расхождения не превышают допустимые. Расчетные значения t-статистики Стьюдента для мощности рудного интервала, метропроцента и содержания урана соответственно равны 1,55, 0,33 и 0,57. Метропроцент – это произведение мощности рудного интервала ( $m$ ) на содержание в нем полезного компонента (%). Это меньше критического значения 2,02 для  $P = 95 \%$ , а относительные расхождения средних величин для этих параметров не превышают 2 %. Расчетные и критические значения параметров были определены по программе STATISTICA 10.0.

Таблица 1 – Оценка достоверности результатов 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 был произведен сравнительный анализ результатов ГК для всех технологических и разведочных скважин, по которым был выполнен каротаж КНД-М. Расчетные значения t-статистики Стьюдента гораздо выше критических. Пороговое для 99,9 % доверительной вероятности составляет 3,319. В то же время расчетные значения составляют 8,17 для мощности и 4,12 для метропроцента (табл. 2).

Таблица 2 – Оценка достоверности результатов КНД-М в сопоставлении с контрольным методом (гамма-каротаж)

Показатели сопоставления	ГК			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 = 99,9 %)				3,319	3,319	3,319
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, %				-9,34	-16,2	-2,5

Тем самым t-статистика показывает наличие статистически значимых расхождений в мощности РИ и в метропроценте между ГК и КНД-М. Так, по мощности имеет место занижение по результатам ГК на 9,34 %, 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 величины существенного занижения метропроцента. Для исключения таких расхождений производилась корректировка базы данных КНД-М и формирование объединенной выборки по всем методам исследования.

С целью получения репрезентативных выборок для статистической оценки средних значений  $K_{pp}$  по результатам КНД-М и ГК в проницаемых рудах для мешков и крыльев месторождений было проведено объединение соответствующих выборок по разведочным и технологическим скважинам.

Идея создания данной выборки заключалась в объединении исходной БД с рассчитанным  $K_{pp}$  с данными КНД-М при геолого-разведочных работах и КНД-м при технологическом бурении.

Учитывая, что менее половины скважин, в которых выполнен КНД-М, были подвергнуты опробованию, на данном этапе включим в расчет  $K_{pp}$  только опробованные разведочные скважины и технологические скважины с КНД-М. Такое объединение позволит сформировать наиболее полную статистическую базу данных на основе имеющихся на месторождении сведений. Таким образом, из 32 разведочных скважин с КНД-М в статистической базе данных остается лишь 12. К ним добавляется 92 технологических скважины с КНД-М и 167 скважин с кернавой аналитикой. Таким образом, в исследуемой статистической выборке участвует 271 скважина с 833 рудными интервалами (321 для мешков и 512 для крыльев месторождений соответственно).

Расчет статистических характеристик, характеризующих точность и достоверность итоговой оценки средних значений  $K_{pp}$  для различных морфологических элементов рудной залежи (мешки и крылья по рисунку 3) для скорректированной объединенной выборки приведен в виде итоговых результатов статистического анализа (табл. 3).

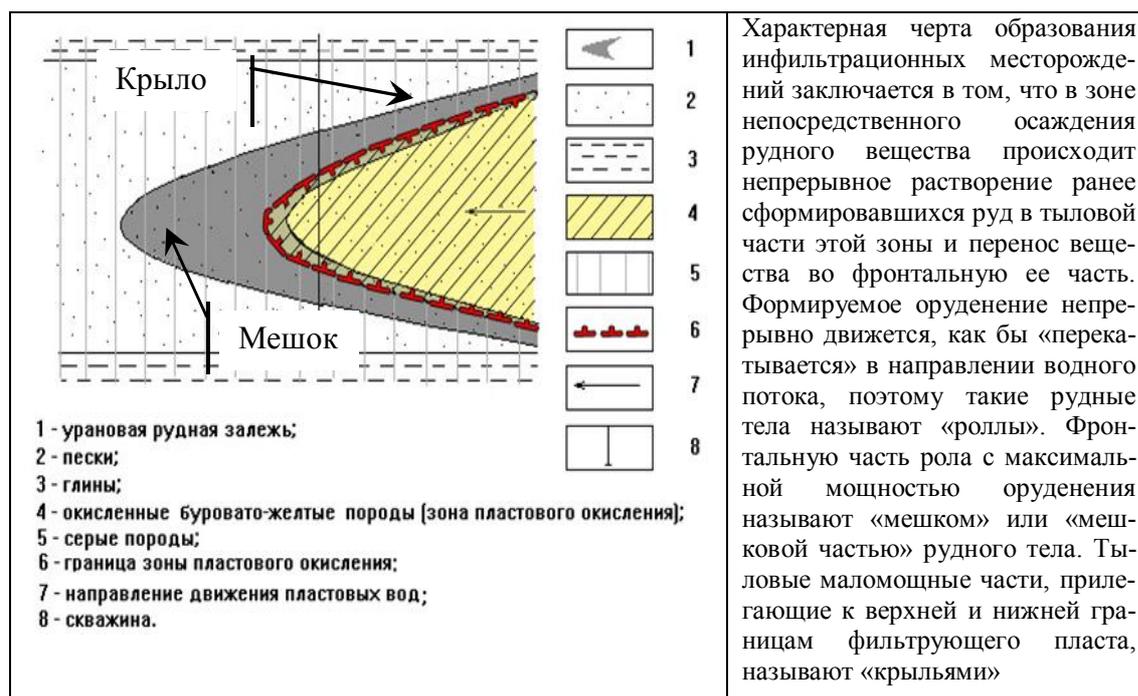


Рисунок 3 – Геохимическая зональность в пласте с рудной залежью роллового типа

Таблица 3 – Статистические характеристики полной объединенной выборки для оценки средних значений  $K_{pp}$  по данным каротажей КНД-М, ГК и ГО технологических и разведочных скважин

Статистическая характеристика	Для мешков	Для крыльев
Количество рудных интервалов	321	512
Среднее значение $K_{pp}$ , отн. ед.	0,543	0,784
СКО для $K_{pp}$ , отн. ед.	0,225	0,257
Погрешность среднего $K_{pp}$ , отн. ед.	0,012	0,011
Относительная погрешность определения среднего $K_{pp}$ (для $P = 95 \%$ ), % отн.	3,99	2,98
Расчетное значение критерия Смирнова	3,20	3,74
Критическое значение статистики Смирнова для $P = 95 \%$	3,61	3,75
Расчетные и критические значения параметров были определены с использованием программы STATISTICA 10.0		

Таким образом, обе объединенные выборки, представляющие из себя полную базу данных по  $K_{pp}$ , полученных различными методами (ГО, ГК и КНД-М), репрезентативны, 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 % [6]. Полученные характеристики соответствуют основным инструктивным требованиям Инструкции по гамма-каротажу [5] в части точности определения средней оценки  $K_{pp}$  и требованиям к выборкам, предназначенным для определения средних оценок  $K_{pp}$ .

Таким образом, предложенный подход к оценке  $K_{pp}$  по геофизическим данным позволил существенно поднять представительность выборок и точность оценки  $K_{pp}$  для мешков и крыльев.

**Статистическое моделирование мощности рудных интервалов.** На следующем этапе было проведено статистическое моделирование мощности рудных интервалов в зависимости от характера морфологических границ на основе определения трендов графиков бортовых кондиций  $cRa_{cp}/cRa_{борт}$ . Они были построены на основании определения зависимости бортовой массовой доли радия на границах рудных (по урану) интервалов от средней массовой доли радия (рис. 4) [4]. Очевидно, что на границах бортовых кондиций мешковой и крыльевой части залежи зависимости, выражающие отношение среднего радия по борту 0,012 % к среднему радию в рудном интервале, весьма устойчивы, изменяясь от 0,01  $cRa_{cp}$  до 0,06 (серая область на рисунке 4). Коэффициент достоверности аппроксимации для регрессионных уравнений достаточно велик и составляет 0,96 для крыльев и 0,99 для мешков соответственно.

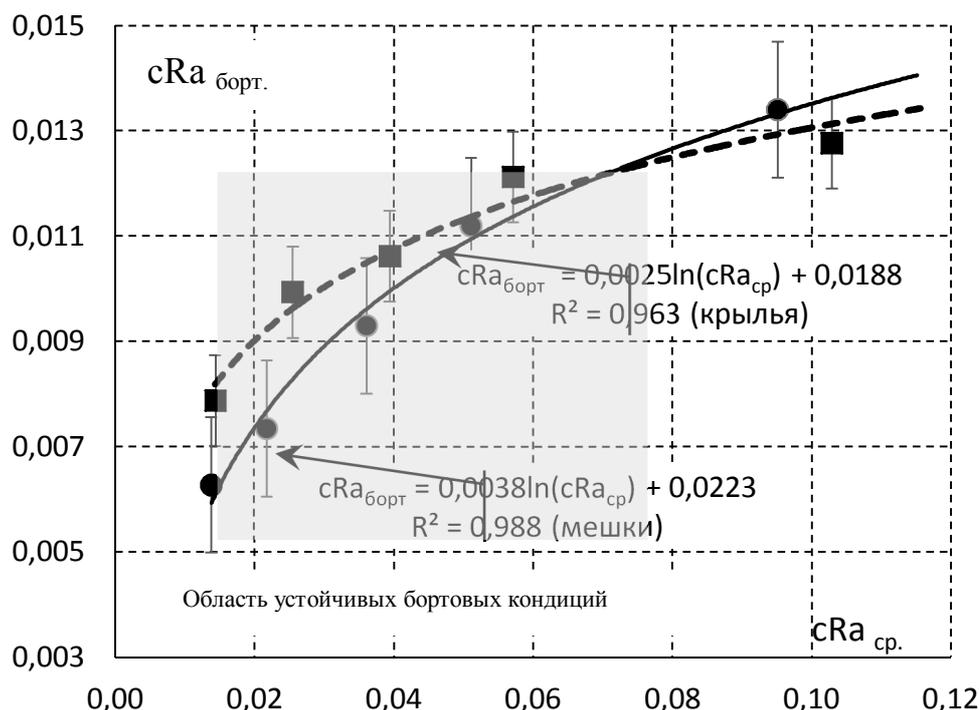


Рисунок 4 – Зависимости бортовой массовой доли радия на границах рудных (по урану) интервалов от средней массовой доли радия  $cRa_{cp}/cRa_{борт}$  для мешков и крыльев

Таким образом, на основе анализа альтернативных регрессионных взаимосвязей и выбора зависимостей с максимальным коэффициентом достоверности аппроксимации получаем следующие логарифмические тренды  $cRa_{cp}/cRa_{борт}$ :

$$cRa_{борт} = 0,0038 \ln(cRa_{cp}) + 0,0223, R^2 = 0,988 \text{ (для мешков);} \quad (1)$$

$$cRa_{борт} = 0,0025 \ln(cRa_{cp}) + 0,0188, R^2 = 0,963 \text{ (для крыльев).} \quad (2)$$

Данные уравнения взаимосвязи  $cRa_{борт} = f(cRa_{cp})$  целесообразно использовать для расчета границ рудных интервалов (рис. 4).

В итоге мы приходим к выводу о приемлемости приведенных разведочных зависимостей  $cRa_{cp}/cRa_{борт}$  и о верности подсчета мощностей рудных интервалов на технологических блоках. Для всех технологических блоков рудника с переизвлечением (наличие на данный момент времени объемов добычи из технологического блока с уже погашенными запасами) был произведен аналогичный расчет мощностей по кривым  $cRa_{cp}/cRa_{борт}$  и внесены соответствующие поправки в окончательный расчет средних параметров для подсчета запасов технологического блока.

На следующем этапе исследования было проведено статистическое моделирование коэффициента радиоактивного равновесия от среднего содержания радия для определения искомого содержания урана в рудном интервале [10] (рис. 5).

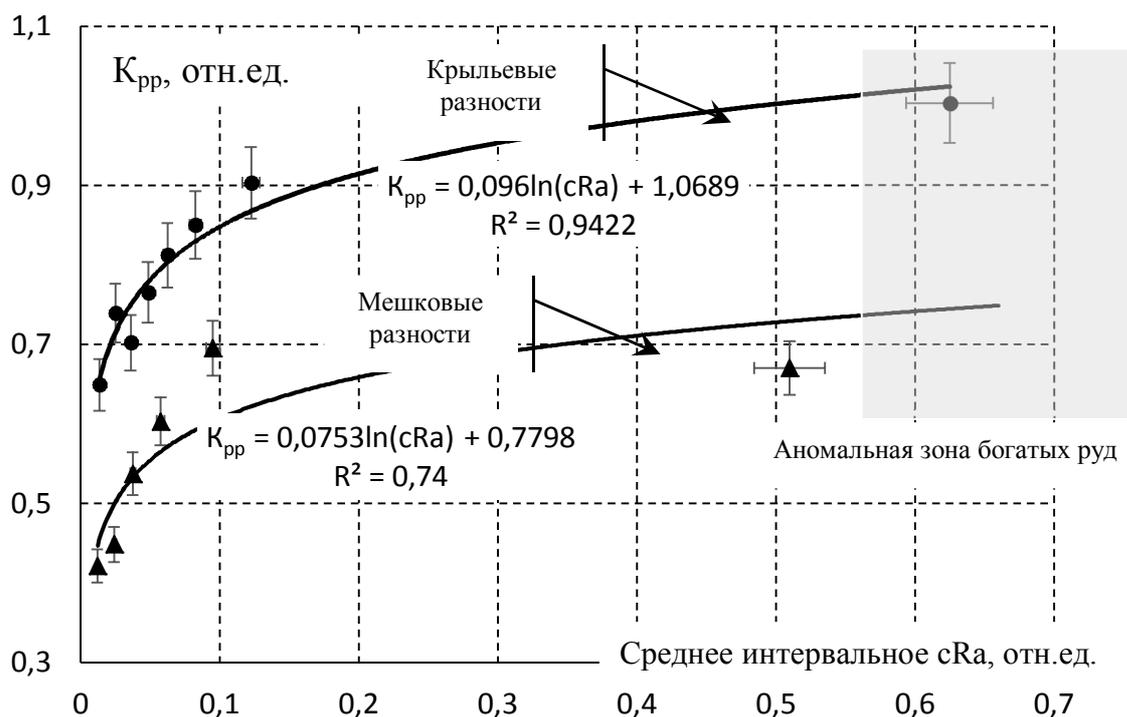


Рисунок 5 – Зависимость  $K_{pp}$  от среднего содержания радия (по данным объединенной статистической базы)

Причиной отклонений экстраполяционной кривой от фактических данных послужило наличие на месторождении участков (зон) богатых руд с аномально низкими средними значениями  $K_{pp}$ , которые изначально были отнесены к технологическому забалансу,  $cRa = 0,51$ ,  $K_{pp} = 0,67$  (для мешков) и  $cRa = 0,63$ ,  $K_{pp} = 1,0$  (для крыльев) – серая зона на рисунке 5. 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.

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.

Таким образом, для всех блоков с извлечением выше 100 % по отношению к прогнозному значению, либо с аномальным темпом извлечения проверяется интерпретация мощностей рудных интервалов и определяются области, нуждающиеся в корректировке по следующему алгоритму.

Этап 1. Определение рудных интервалов по кривой соотношения  $cRa_{cp}/cRa_{борт}$ . (выверяется мощность рудных интервалов путем проверки подсчитанного среднего содержания Ra в верхнем и нижнем контакте рудного интервала).

Этап 2. Определение  $K_{pp}$  по статистической зависимости отдельно для различных элементов рудной залежи (мешков и крыльев).

Этап 3. Расчет средних значений мощностей рудных интервалов и средневзвешенных содержаний урана в зависимости от полученного значения  $K_{pp}$ .

Этап 4. Расчет удельной продуктивности и подсчет запасов технологического блока рудника подземного скважинного выщелачивания [7–9].

Непосредственно моделирование (пересчет уровня радия – определение содержания урана – пересчет  $K_{pp}$  – определение мощности рудного интервала и метропроцента - расчет запасов технологического блока) прироста запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана производится на основе полученных зависимостей  $K_{pp}$  от  $cRa$ . Для мешков:

$$K_{pp} = 0,0753 \ln(cRa) + 0,7798, R^2 = 0,74, \quad (3)$$

при  $cRa < 0,1$  %;  $K_{pp} = 0,7$  при  $cRa \geq 0,1$  %.

$K_{pp}$  для крыльев принимается в виде зависимости от  $cRa$  по:

$$K_{pp} = 0,096 \ln(cRa) + 1,0689, R^2 = 0,9422, \quad (4)$$

при  $cRa < 0,12$  %;  $K_{pp} = 0,96$  при  $cRa \geq 0,12$  %.

Ориентируясь на такие ограничения, были смоделированы основные параметры подсчета запасов технологических блоков. Следует отметить, что применение данных зависимостей позволя-

ет рассчитывать рудные интервалы с параметрами, определяющими запасы блоков, более адекватными по извлечению, нежели запасы, оцененные предприятием.

Таким образом, в результате моделирования были получены значения прироста (относительно расчетных данных предприятия при фиксированных значениях  $K_{pp}$ ) вскрытых запасов (3804 т). Это на 15,6 % больше, чем по первоначальным оценкам предприятия (рис. 6). При этом среднее и стандартное отклонение для извлечения урана составляет  $78,54 \pm 13,3\%$ , а максимальное значение по модели не превышает 91,3 % (рис. 7).



### Технологические блоки месторождения

Рисунок 6 – Результаты моделирования прироста запасов технологических блоков месторождения

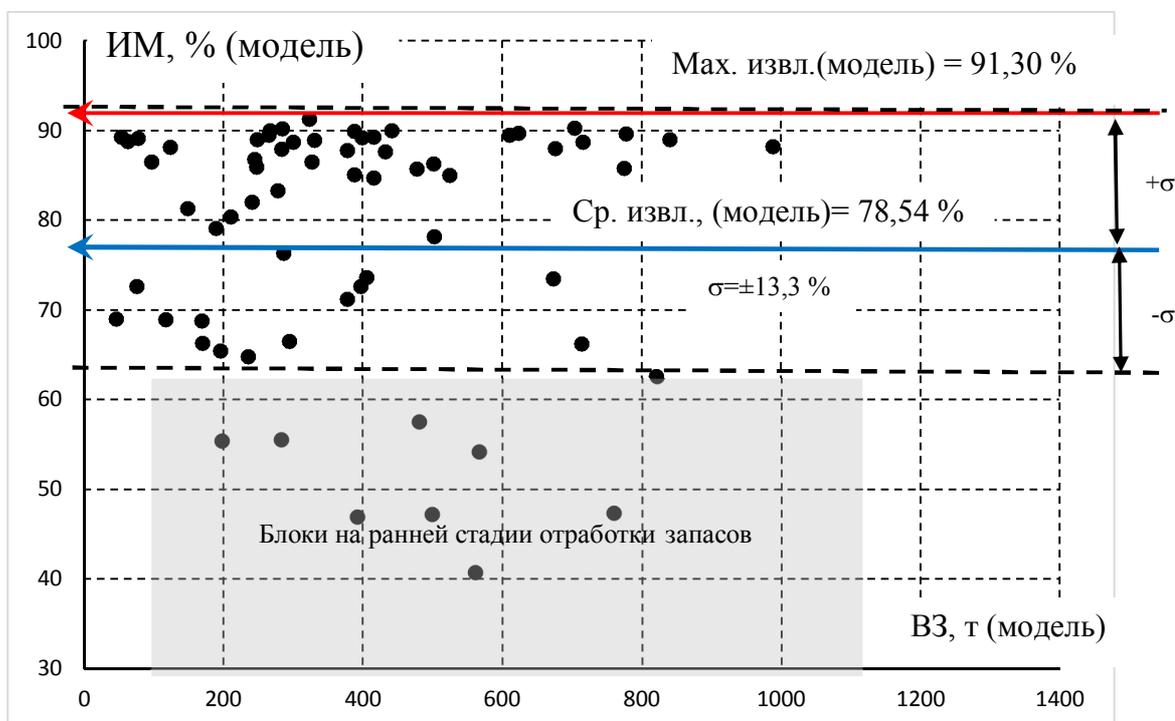


Рисунок 7 – Извлечение металла (ИМ, %) из вскрытых запасов (ВЗ, т) по технологическим блокам месторождения по результатам моделирования (среднее значение извлечения металла ( $ИМ_{ср.знач} = 78,54\%$ ), стандартное отклонение для извлечения металла составляет ( $\sigma = \pm 13,3\%$ ),  $ИМ_{max} = 91,3\%$ )

Проведенный по результатам моделирования анализ соотношения ГРМ и вскрытых запасов месторождения позволил получить значимую регрессионную взаимосвязь между коэффициентом вскрытых запасов, численно равным

$$(K_{вз} = (1 - (ГРМ - ВЗ) / ГРМ) * 100 \%), \quad (5)$$

и вскрытыми запасами месторождения по результатам моделирования (рис. 8).

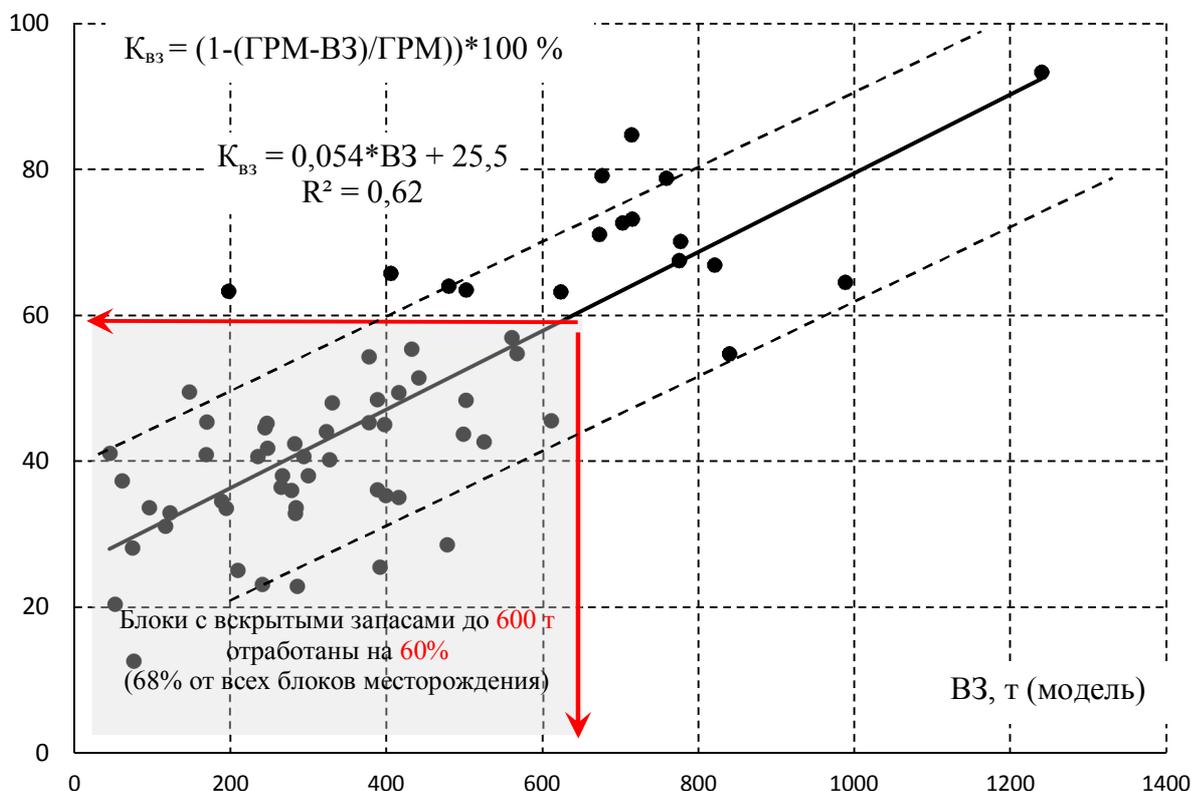


Рисунок 8 – Ресурсный «потенциал» ( $K_{вз}$  – коэффициент отработки вскрытых запасов) месторождения по данным моделирования вскрытых запасов технологических блоков

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 отработке технологических блоков месторождения в отношении промышленных запасов урана (рис. 8).

**Заключение.** Таким образом, выполненные исследования позволили 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 используемой серной кислоты. В целом это позволило повысить качество прогнозирования и планирования производственных показателей, обеспечить успешное выполнение производственной программы добычи урана.

**Выводы.** 1. Проведен сравнительно-сопоставительный анализ методов оценки запасов технологического блока, таких как керновое геологическое опробование, гамма-каротаж, метод мгновенных нейтронов деления, и определены специфические особенности статистической интерпретации полученных данных. Были выявлены систематические и случайные (по статистическим критериям) расхождения в параметрах рудных интервалов для различных классов руд и морфологических элементов. Установлено, что качество каротажа КНД-М удовлетворительное. Результаты КНД-М обладают достаточно высокой степенью достоверности и могут быть использованы для количественной оценки  $K_{pp}$  рудных интервалов.

2. На основе сформированной объединенной и скорректированной статистической базы данных по разведочным и технологическим скважинам были получены регрессионные взаимосвязи коэффициента радиоактивного равновесия от среднего содержания Ra и определены численные значения  $K_{pp}$  для мешковых и крыльевых элементов рудной залежи.

3. Проведено статистическое моделирование мощности рудных интервалов в зависимости от характера морфологических границ на основе определения трендов графиков бортовых кондиций  $cRa_{cp}/cRa_{орт}$  и определена необходимость корректировки рудных мощностей на основании определения зависимости бортовой массовой доли радия на границах рудных (по урану) интервалов от средней массовой доли радия.

4. Разработан подход к интерпретации и пересчету запасов технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана. Его концепция заключается в определении основных причин переизвлечения запасов на месторождении, выявлении статистически значимых расхождений между результатами расчета рудных интервалов по ГК и контрольными методами, определении процента занижения результатов по ГК в зависимости от морфологии и/или от класса руд по содержанию, переинтерпретации морфологии (при необходимости) и расчете новых значений  $K_{pp}$  на основе максимально широкого набора данных, что позволит разработать предложения по оптимизации расходов на горно-подготовительные работы и непосредственно добычу.

5. Предлагаемый подход позволит переоценить ресурсный потенциал технологического блока с одновременным обоснованным прогнозом остаточных запасов урана в эксплуатируемых и вскрываемых блоках, снизить затраты на стадии горно-подготовительных работ, снизить потребность в электроэнергии, оптимизировать количество серной кислоты и в целом повысить качество прогнозирования и планирования производственных показателей с целью безусловного выполнения производственной программы добычи урана.

#### Библиографический список

1. Басов В. С. Выбор оптимальной схемы вскрытия месторождения геотехнологическими скважинами / В. С. Басов // Горный журнал. – 2006. – № 1. – С. 51–53.
2. Верхотуров А. Г. Интенсификация добычи урана при использовании комплекса обработки прифилтровых зон геотехнологических скважин / А. Г. Верхотуров, А. А. Сабигатулин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 7. – С. 13–20.
3. Голик В. И. Инновационные технологии добычи урана / В. И. Голик // Горный журнал. – 2009. – № 2. – С. 12–15.
4. Дементьев А. А. Компьютерная модель расчета технико-экономических показателей (на примере месторождений урана для разработки подземным выщелачиванием) / А. А. Дементьев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1999. – № 2. – С. 169–175.
5. Инструкция по гамма-каротажу на месторождениях урана (МИ-№ 115/210-(01.00250-2008)-2011). – СПб. : ФГУНПП «Геологоразведка», 2012. – 135 с.
6. Инструкция по каротажу методом мгновенных нейтронов деления при изучении урановых месторождений гидрогенного типа. – Ленинград : НПО «Рудгеофизика», 1985. – 63 с.
7. Рогов А. Е. К определению оптимального уровня извлечения урана при подземном скважинном выщелачивании / А. Е. Рогов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 9. – С. 119–121.
8. Рогов Е. И. Оптимизация подготовленных и готовых к выемке запасов на рудниках подземного скважинного выщелачивания урана / Е. И. Рогов, А. Е. Рогов, В. Г. Язиков, В. Л. Забазнов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 4. – С. 149–150.
9. Шаталов В. В. Подземное выщелачивание урана и пути его совершенствования / В. В. Шаталов, М. И. Фазлуллин // Цветные металлы. – 2003. – № 4. – С. 35–39.
10. Шурыгин С. В. Влияние коэффициента радиоактивного равновесия на сортируемость руд радиометрическими методами / С. В. Шурыгин, В. А. Овсейчук // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 4. – С. 376–381.

#### References

1. Basov V. S. Vybory optimalnoy skkhemy vskrytiya mestorozhdeniya geotekhnologicheskimi skvazhinami [Selection optimal scheme field opening by geotechnological wells]. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], 2006, no. 1, pp. 51–53.
2. Verkhoturov A. G., Sabigatulin A. A. Intensifikatsiya dobychi urana pri ispolzovanii kompleksa obrabotki prifiltrovnykh zon geotekhnologicheskikh skvazhin [Intensification of uranium mining using the geotechnological wells filter zones treatment complex]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2019, no. 7, pp. 13–20.
3. Golik V. I. Innovatsionnye tekhnologii dobychi urana [Innovative uranium mining technologies]. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no. 2, pp. 12–15.
4. Dementev A. A. Kompyuternaya model rascheta tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley (na primere mestorozhdeniy urana dlya razrabotki podzemnym vyshchelachivaniem) [Technical and economic indicators calculation computer model (on the example uranium deposits for development by underground leaching)] *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 1999, no. 2, pp. 169–175.
5. *Instruktsiya po gamma-karotazhu na mestorozhdeniyakh urana (MI-№ 115/210-(01.00250-2008)-2011) FGUNPP «Geologorazvedka»* [Instruction on gamma-ray logging at uranium deposits (MI-№ 115/210-(01.00250-2008)-2011)]. St. Petersburg, FSUNPP “Geological Exploration”, 2012. 135 p.

6. *Instruktsiya po karotazhu metodom mgnovennykh neytronov deleniya pri izuchenii uranovykh mestorozhdeniy gidroennogo tipa* [Instruction on instantaneous fission neutron logging in the hydrogen uranium deposits study]. Leningrad, NPO «Rudgeofizika» Publ., 1985. 63 p.

7. Rogov A. E. K opredeleniyu optimalnogo urovnya izvlecheniya urana pri podzemnom skvazhinnom vyshchelachivaniy [To determine the uranium extraction optimal level in underground well leaching]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2003, no. 9, pp. 119–121.

8. Rogov E. I., Rogov A. E., Zabaznov V. L., Yazikov V. G Optimizatsiya podgotovlennykh i gotovykh k vyemke zapasov na rudnikakh podzemnogo skvazhinного vyshchelachivaniya urana [Optimization of prepared and ready-to-excavate reserves at uranium]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. 4, pp. 149–150.

9. Shatalov V. V., Fazlullin M. I. Podzemnoe vyshchelachivanie urana i puti ego sovershenstvovaniya [Underground leaching of uranium and ways its improvement]. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous Metals], 2003, no. 4, pp. 35–39.

10. Shurygin S. V., Ovseychuk V. A. Vliyaniye koeffitsienta radioaktivnogo ravnovesiya na sortiruemost rud radiometricheskimi metodami [Effect of the radioactive equilibrium coefficient on the sortability ores by radiometric methods]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2016, no. 4, pp. 376–381.