

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

Кафедра «Геофизика и сейсмология»

Баилова Сабина Амантаевна
Яремкив Юлия Андреевна

Оценка поправок и зависимостей, применяемых при интерпретации геофизических
данных на месторождениях урана

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6B07201 – Нефтегазовая и рудная геофизика

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казакский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

Кафедра Геофизика и сейсмология

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
Геофизики и сейсмологии
доктор технических наук,
профессор

34
Ратов Б.Т.
«17» 06 2025 г.



ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Оценка поправок и зависимостей, применяемых при интерпретации
геофизических данных на месторождениях урана»

6B07201 – Нефтегазовая и рудная геофизика

Выполнили

Базилова С.А.
Яремкв Ю.А.

Рецензент

Ведущий менеджер
Геофизического управления
«ГЕОТЕХЦЕНТР»

Букусбаева Д.Б.
«17» 06 2025 г.



Научный руководитель
Доктор PhD,
ассоциированный профессор
Темирханова Р.Г.
«17» 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

Кафедра Геофизика и сейсмология

Специальность 6В07201 – Нефтегазовая и рудная геофизика

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
Геофизики и сейсмологии
Доктор технических наук,
профессор

_____ Рагов Б.Т.
« 12 » _____ 2025 г.



ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающимся Базиловой С.А., Яремкив Ю.А.

Тема: Оценка поправок и зависимостей, применяемых при интерпретации геофизических данных на месторождениях урана

Утверждена приказом 26-П/0 № от «29» 09 2025 г.

Срок сдачи законченной работы «19» 06 2025 г.

Исходные данные к дипломной работе: были отобраны во время прохождения преддипломной практики.

Краткое содержание дипломной работы:

а) Общие сведения о месторождении (геолого-геофизическая характеристика месторождения, геолого-геофизическая изученность, тектоника, стратиграфия, урановое оруденение)

б) Методика проведения геофизических работ

в) Анализ и оценка поправок и зависимостей

Перечень графического материала: представлены 25 слайдов презентации работы

Рекомендуемая основная литература: из 2 наименований. 1 «Отчет по результатам детальной разведки с подсчетом запасов урана по категориям С1 и С2 на участке 2 месторождения Буденновское по состоянию на 01.01.2015» г. Алматы, 2015 г., 2 Отчет по глубинному геологическому картированию мезозойско-кайнозойского чехла Чу-Сарысуйской депрессии в масштабе 1:200000 листов L-42-XXII, XXVIII, XXXII(124), XXXIII, XXXIV, K-42-III (5-Б, 6-А,Б,Г), IV (7-8) за 1996–2001 гг. – 2001.

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Геолого-геофизическая характеристика месторождения	26.03.2025	
Методика проведения геофизических работ	15.04.2025	
Анализ и оценка поправок и зависимостей	5.05.2025	

Подписи

консультантов и норм контролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы.

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Геолого-геофизическая характеристика месторождения	Раушан Галимжановна Темирханова Доктор PhD, ассоциированный профессор	10.06.2025г.	
Методика проведения геофизических работ	Раушан Галимжановна Темирханова Доктор PhD, ассоциированный профессор	12.06.2025г.	
Анализ и оценка поправок и зависимостей	Раушан Галимжановна Темирханова Доктор PhD, ассоциированный профессор	14.06.2025г.	
Норм контролер	Зухра Нигметжановна Аблесенова Магистр технических наук, старший преподаватель	16.06.25	

Научный руководитель

 Темирханова Р.Г.

Задание приняли к исполнению обучающиеся

 Базилова С.Б.

 Яремкив Ю.А.

Дата

«17» 06 2025 г

АННОТАЦИЯ

На тему «Оценка поправок и зависимостей, применяемых при интерпретации геофизических данных на месторождениях урана».

В данной дипломной работе рассматриваются методы оценки и уточнения поправок и зависимостей, используемых при интерпретации и пересчете запасов урана на территории месторождения Буденновское.

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы.

В работе уделено особое внимание оценке влияния поправок и геологических зависимостей, таких как литологическая неоднородность, эффект отжата радиона и нарушение радиоактивного равновесия, на результаты гамма-каротажа, КНД-м и других методов геофизических исследований.

Цель работы заключалась в анализе и обосновании подходов к учету указанных факторов при подсчете стволовых запасов урана. В ходе исследования были проанализированы типовые геофизические методы, выявлены ключевые физико-геологические параметры, влияющие на интерпретацию, а также рассмотрены существующие поправочные коэффициенты и эмпирические зависимости, применяемые на практике.

АНДАТПА

Уран кенорындарындағы геофизикалық мәліметтерді түсіндіруде қолданылатын түзетулер мен тәуелділіктерді бағалау» дипломдық жұмысына жазылған андатпа.

Бұл дипломдық жұмыс Будённовское кенорны аумағындағы уран қорларын есептеу кезінде қолданылатын түзетулер мен тәуелділіктерді бағалау және нақтылау әдістерін қарастырады.

Жұмыс кіріспеден, 5 тараудан, қорытындыдан және пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады.

Жұмыста гамма-каротаж, КНД-м және басқа геофизикалық зерттеу әдістерінің нәтижелеріне литологиялық әртектілік, радонның булану әсері және радиоактивті тепе-теңдіктің бұзылуы сияқты түзетулер мен геологиялық тәуелділіктердің әсерін бағалауға ерекше көңіл бөлінген.

Жұмыстың мақсаты ұңғымадағы уран қорын есептеу кезінде осы факторларды есепке алу тәсілдерін талдау және негіздеу болып табылады. Зерттеу барысында типтік геофизикалық әдістер талданды, интерпретацияға әсер ететін негізгі физикалық және геологиялық параметрлер анықталды, тәжірибеде қолданылатын қолданыстағы түзету факторлары мен эмпирикалық тәуелділіктер қарастырылды.

ANNOTATION

On the topic of «Evaluation of corrections and dependencies used in the interpretation of geophysical data at uranium deposits».

This thesis deals with the methods of evaluation and refinement of corrections and dependencies used in the interpretation and recalculation of uranium reserves at the Budennovskoye deposit.

The work consists of introduction, 5 chapters, conclusion, list of used literature.

The relevance of the topic is due to the need to improve the reliability of geophysical forecasts and interpretations, especially in conditions of complex structure of ore-bearing strata and inhomogeneous distribution of uranium. The study analyses the influence of various factors - lithological composition, porosity, mineralisation - on the results of gamma-ray, neutron and electrical logs. Special attention was paid to the adjustment of conversion factors, corrections and density to find a final decision on the adjustment and further application of radiological corrections, mass reassessment of reserves of technological blocks, correction of the movement of reserves by type (balance, opened and finished).

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Общие сведения о месторождении	8
2 Геологическое строение месторождения	11
2.1 Литолого-стратиграфическая характеристика	11
2.2 Тектоника	18
2.3 Урановое оруденение	21
3 Изученность района	24
3.1 История освоения месторождения	24
3.2 Геологическая изученность района	25
3.3 Гидрогеологическая изученность района	27
3.4 Геофизическая изученность района	28
4 Методика геофизических работ, оборудование	30
4.1 Геологические задачи ГИС	30
4.2 Виды и объемы ГИС	30
4.3 Метрологическое обеспечение работ	45
5 Анализ и оценка поправок и зависимостей	48
5.1 Оценка достоверности результатов гамма-каротажа	48
5.2 Оценка поправок и зависимостей, применяемых при интерпретации ГК	53
5.2.1 Анализ применяемых зависимостей K_{pp} от средней массовой доли радия в РИ для мешков и крыльев	53
5.2.2 Результаты анализа оценки поправки на «отжатие» радона и зависимостей бортового содержания радия от его среднего содержания в РИ	54
5.3 Оценка качества и достоверности КНД-М	55
5.4 Особенности и результаты определения K_{pp} по данным КНД-М в разведочных и технологических скважинах	63
5.4.1 Особенности применения каротажа КНД-М для оценки K_{pp}	63
5.4.2 Результаты определения K_{pp} по данным каротажа КНД-М в разведочных и технологических скважинах	65
5.5 Оценка роли технологического забаланса как возможного дополнительного источника урана	69
Заключение	72
Перечень сокращений и терминов	73
Список использованной литературы	74

ВВЕДЕНИЕ

Тема дипломной работы:

«Оценка поправок и зависимостей, применяемых при интерпретации геофизических данных на месторождениях урана»

Актуальность темы:

В условиях растущей потребности в уране как стратегическом энергетическом ресурсе, особенно в связи с развитием атомной энергетики, повышается значимость эффективной разведки и оценки урановых месторождений. Геофизические методы играют ключевую роль в выявлении и изучении урановых объектов. Однако точность интерпретации геофизических данных существенно зависит от правильного учета поправок и геологических зависимостей, таких как литологическая неоднородность, «отжатие» радона и нарушение радиоактивного равновесия. Отсутствие систематического подхода к оценке и применению этих поправок может приводить к ошибочной трактовке результатов ГИС и снижению эффективности геологоразведочных работ. Поэтому актуальной задачей становится обоснование поправок и зависимостей, обеспечивающих повышение достоверности интерпретации геофизических данных при поисках и разведке урана.

Цель работы:

Оценить влияние различных поправок и геологических зависимостей на результаты интерпретации геофизических данных, применяемых при изучении урановых месторождений.

Задачи исследования:

- проанализировать типовые геофизические методы, применяемые при разведке урана;
- выявить основные физико-геологические факторы, влияющие на результаты геофизических измерений на урановых месторождениях;
- исследовать существующие поправки и зависимости, используемые в практике интерпретации.

Объект исследования:

Объектом исследования являются геофизические данные, полученные при разведке урановых месторождений, включая результаты гамма-каротажа, КНД-м и других геофизических наблюдений, а также физико-геологические параметры, влияющие на достоверность их интерпретации.

1 Общие сведения о месторождении

Месторождение Буденновское расположено на территории Сузакского района Туркестанской области Республики Казахстан. Этот регион входит в пределы Шу-Сарысуйской депрессии — крупной геологической структуры, известной своими богатыми залежами полезных ископаемых. Административное положение месторождения и его окрестностей показано на рисунке 1 — Обзорная административная карта района [1, 4].

Буденновское месторождение занимает юго-западную часть Шу-Сарысуйской депрессии, ограниченную с востока меридианом $70^{\circ}00'$, с севера и юга — параллелями $46^{\circ}00'$ и $43^{\circ}40'$. Юго-западная граница расположена на стыке площади с хребтом Большой Каратау и имеет сложную ступенчатую форму. Площадь месторождения составляет около 26 км². В административном отношении оно находится в Сузакском районе Туркестанской области. Ближайшими населенными пунктами являются бывший совхоз Каратауский и поселок Аксумбе, расположенные в 40 км южнее месторождения, а также поселок Тайкыныр, находящийся в 60 км к северу. Тайкыныр является базой экспедиции №7 АО «Волковгеология».

Орографически территория месторождения расположена на пологонаклонной слаборасчлененной предгорной равнине, сменяющейся ближе к горам Каратау среднерасчлененной предгорной равниной. Поверхность осложнена плоскодонными впадинами с такыровидными и солончаковыми покрытиями, а по периферии развиты мелкобугристые и кучевые пески. В районе поселка Сузак равнина осложнена тектоническими нарушениями. Поверхность среднерасчлененной равнины имеет холмисто-увалистый облик с относительными превышениями 3–4 м, глубиноэрозионных врезов 5–20 м. Абсолютные отметки в предгорьях хребта Большой Каратау — в пределах 450–480 м.

На север от месторождения простирается песчаный массив Моинкум шириной 20–30 км, представленный крупно- и мелкогрядовыми, бугристыми песками. Их абсолютные отметки достигают 240–330 м, относительные превышения над плоскодонными впадинами — 10–15 м. Днища впадин заняты такырообразными поверхностями. В краевых частях массива преобладают мелкобугристые пески. Юго-западная часть района примыкает к хребтам Большого и Малого Каратау и характеризуется холмистым и низкогорным рельефом. На северо-востоке хребта Каратау преобладает склоновый мелкосопочник с абсолютными отметками 480–800 м и относительными превышениями 30–40 м. Низкогорный рельеф представлен асимметричными склонами: крутые северо-восточные и более пологие юго-западные. Абсолютные высоты достигают 1418 м к западу от горы Ительги, а относительные превышения до 600–700 м.

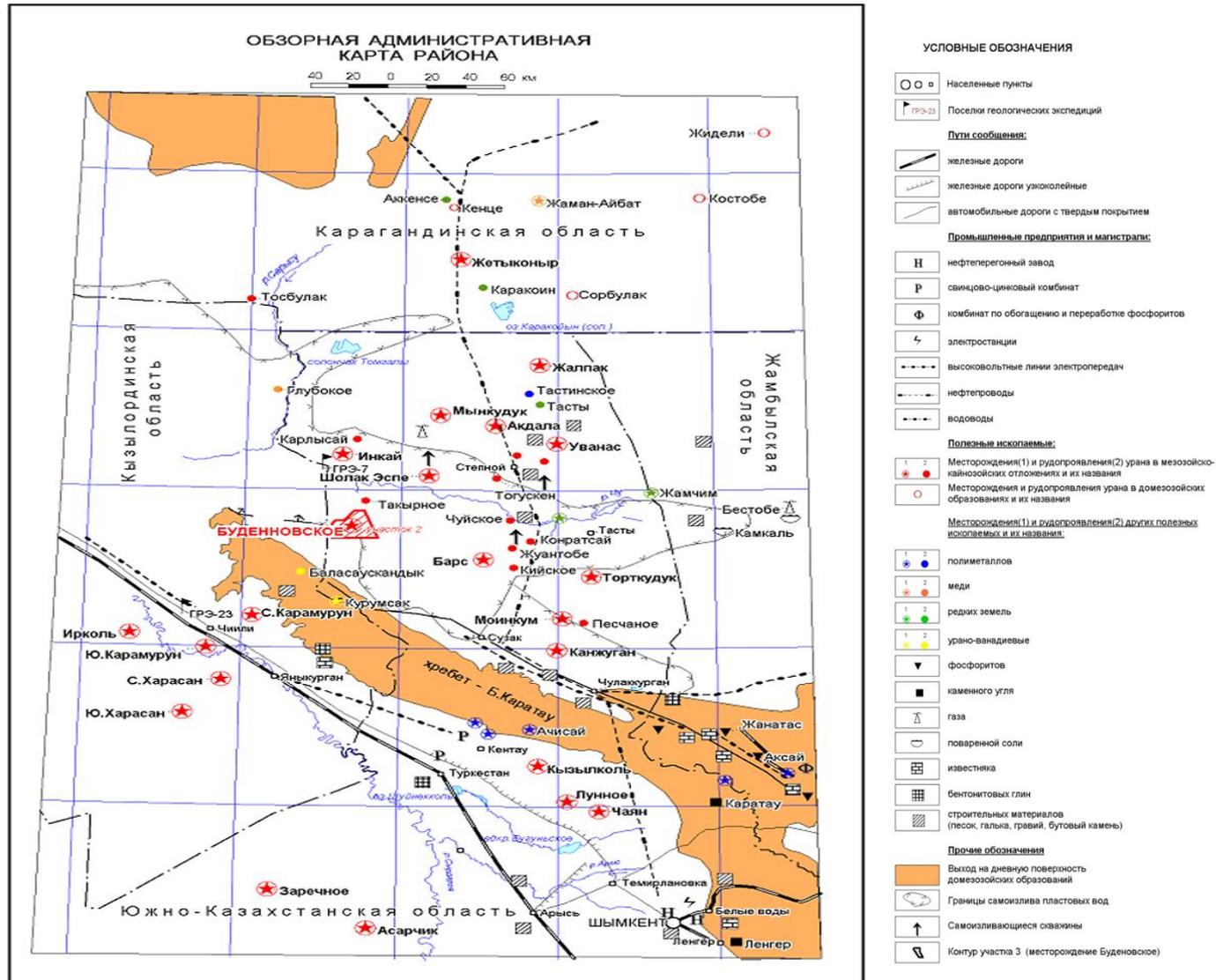


Рисунок 1 — Обзорная административная карта района.

Гидрография района бедна: в равнинной части представлена единственной водной артерией — рекой Чу, протекающей с востока на запад к югу от плато Бетпақдала. В период паводков расход воды в районе поселка Тасты составляет 49 м³/с, ширина реки достигает 70–75 м. В летнее время река пересыхает, минерализация воды возрастает до 12 г/дм³. В пойме р.Чу расположено множество озёр, в основном солоноватых. Единственное пресное — озеро Большие Камкалы. В предгорьях Малого Каратау встречаются озера, питаемые родниками, наиболее крупное — Кызылколь, с минерализацией до 15 г/дм³.

Климат района резко континентальный, с большими годовыми и суточными колебаниями температур. Абсолютный минимум температуры зафиксирован в январе в районе Бетпақдала (-40 °С), максимум – в июле (+46 °С). Годовая амплитуда температур достигает 86 °С. Осадков выпадает крайне мало — от 133 мм на севере до 250 мм в предгорной зоне, в то время как испарение превышает 900–1000 мм в год. Район подвержен сильным ветрам и пыльным бурям: на севере преобладают восточные и северо-восточные ветры, на юге — юго-западные и северо-восточные, со скоростью до 25–35 м/с.

Почвенный покров преимущественно такыровидный и палево-бурый пустынный; у подножий гор — светлые сероземы, в горных районах — сероземы и горные коричневые почвы. Растительность скудная: в равнинных частях — ковыль, полынь, саксаул, солянки; в пойме реки — камыш, тамариск, луговые травы; в горах — древесно-кустарниковая. Животный мир представлен сайгаками, джейранами, зайцами, тушканчиками, волками, орлами, дрофами, пеликанами и др.

В пределах Шу-Сарысуьской депрессии уже ведется разработка урановых месторождений Уванас, Мынкудук, Инкай, Канжуган, Моинкум и Акдала. На этих объектах применяют способ подземного выщелачивания. Построены новые поселки городского типа: Степное (Уванас), Таукент (Канжуган и Моинкум), Тайконур (Инкай). Через район проходит нефтепровод Павлодар–Шымкент с линией электропередачи. Несмотря на развитие уранодобычи, большинство горнорудных предприятий в Большом и Малом Каратау приходят в упадок, что приводит к оттоку населения из Жанатаса, Ачсая, Кентау.

Буденновское месторождение, как и другие объекты депрессии, относится к типу песчаниковых урановых руд, локализованных в водоносных пластах: запасы сосредоточены в окисленных рудах, благоприятных для ПВ [3, 8, 12].

Силами экспедиции № 7 с 1988 года начато, а к настоящему времени закончено строительство улучшенной грунтовой дороги с гравийным покрытием между п.Тайконур и п.Бакырлы, которая проходит через южный фланг месторождения Инкай и через все поле месторождения Буденновское [4, 9].

2 Геологическое строение месторождения

2.1 Литолого-стратиграфическая характеристика

Месторождение Буденновское, расположенное в западной части Сузакской позднепалеозойской впадины, является одним из ключевых объектов осадочного происхождения, обладающих значительным потенциалом для добычи урана. Его литолого-стратиграфическая характеристика основана на анализе осадочных и интрузивных пород, залегающих на различных глубинах, начиная от палеозойского фундамента и заканчивая четвертичными отложениями. Важнейшие части разреза месторождения сосредоточены в пределах водоносных горизонтов верхнего мела, который является основным объектом для исследования [4, 17–19]. Пространственное положение и геологическая структура юго-западной части Шу-Сарысуйской депрессии, включая участок №2 месторождения Буденновское, представлены на рисунке 2.1 — Геологическая карта юго-западной части Шу-Сарысуйской депрессии.

В пределах рассматриваемой части Чу-Сарысуйской депрессии (ЧСД), в которую входит и участок №2 месторождения Буденновское, прослеживаются образования широкого возрастного диапазона — от протерозоя и кембрия до четвертичных отложений. В стратиграфическом разрезе региона выделяются три чётко разграниченных комплекса:

Комплекс кристаллического фундамента, охватывающий отложения от протерозоя до раннего ордовика. Эти образования представлены преимущественно метаморфическими и вулканогенно-осадочными толщами кайнарской, шованской, камальской, кокбулакской и курумсакской свит, которые сформировались в докембрии и подверглись интенсивной метаморфизации. На участке №2 месторождения данные комплексы не вскрыты непосредственно, однако их наличие на глубине подтверждено структурно-геофизическими исследованиями.

Комплекс осадочных литифицированных отложений промежуточного структурного этажа (ПСЭ), представленный образованиями от девона до перми. Эти отложения формируют устойчивое жёсткое основание для перекрывающего мезозойско-кайнозойского чехла и повсеместно распространены в пределах описываемого участка. Они представлены терригенными, карбонатными и глинистыми породами, сформированными в различных морских и континентальных условиях осадконакопления [1, 4].

Комплекс слаболитифицированных мезозойско-кайнозойских отложений, охватывающий интервал от верхнего мела до четвертичных образований. Именно этот комплекс составляет основной разрез продуктивной толщи на участке №2. Его мощность возрастает в направлении к югу и юго-востоку, достигая 600–900 м в районе Сузакского разлома и Аксумбинской ступени. Отложения представлены чередующимися песчаными, алевритовыми и глинистыми толщами, среди которых локализованы водоносные горизонты, наиболее благоприятные для образования и аккумуляции урановых минерализаций. Эти горизонты характеризуются повышенной проницаемостью и стратифицированной структурой, способствующей миграции и осаждению урановмещающих растворов. Возрастная и литологическая структура данного комплекса наглядно представлена на рисунке 2.2 — Стратиграфическая колонка мезо-кайнозойских отложений центральной части Шу-Сарысуйской депрессии.

В рудном поле месторождения складчатый фундамент залегает на глубине более 2 км. Средне-верхнепалеозойские осадочные отложения промежуточного этажа в пределах северо-западной оконечности хребта Б. Каратау отходят на дневную поверхность. На самом же месторождении они обнаружены рядом со скважинами на глубинах от 540 м до 750 м. К ним относятся комплексы ранне-каменноугольной морской терригенно-карбонатной формации, характеризующиеся континентальной серией отложений мощностью до 1500 м: джезказганская ($C_{2-3d\check{z}}$) и жиделисайская ($P_{1\check{z}d}$) свиты. Среди последних преобладают красноцветные алевролиты с прослоями песчаников [1,17,18,19].

Палеозойский фундамент.

Нижняя часть геологического разреза месторождения представляет собой палеозойские и интрузивные породы. Эти породы образуют фундамент региона и в основном выходят на поверхность в горных образованиях. На территории месторождения их вскрывают скважины на глубинах свыше 600–700 м [4]. В состав палеозойского фундамента входят метаморфизированные породы, такие как граниты, сланцы и кварциты. Эти породы являются результатом глубоких тектонических процессов и тектонической активности региона в позднепалеозойскую эпоху, когда происходили процессы метаморфизма и интрузии. Эти породы образуют прочную основу для формирования более поздних осадочных слоев и играют важную роль в гидрогеологических процессах, так как могут служить водоупорными слоями для более молодых водоносных горизонтов.

Юрские отложения(I_{1-2}).

На глубинах около 580 м в разрезе месторождения встречаются юрские отложения. Эти породы представлены континентальными терригенными молассами, которые образовались в условиях болотистых низменностей. Основные минералы, присутствующие в этих отложениях, включают серые алевролиты, песчаники и глины с углефицированными остатками растительности. Эти породы служат индикаторами климатических условий

юрского периода, в течение которого на территории региона существовали обширные водоемы и болотные экосистемы. Это свидетельствует о том, что в те времена климат был более влажным, что способствовало накоплению органического вещества и формированию углефицированных остатков растений.

Нижнемеловые отложения(K_1).

В разрезе месторождения также встречаются нижнемеловые отложения, которые представляют собой вишнево-красные глины с прослоями глинистых алевролитов. Эти отложения залегают на глубинах 490–540 м и имеют мощность до 22 м [4, 17–19]. Эти породы имеют значительное значение для геологического понимания изменений климата и условий осадконакопления в нижнемеловом периоде. Нижнемеловые отложения являются важным элементом в геологическом разрезе, поскольку они служат своего рода «сепараторами» между более древними слоями и верхними меловыми отложениями. Сложный состав этих слоев, в том числе наличие различных видов глин, свидетельствует о разнообразных осадочных процессах, происходивших в этом регионе в древности.

Верхнемеловые отложения(K_2).

Верхнемеловые отложения являются основным объектом изучения в месторождении Буденновское, поскольку именно в этих слоях сосредоточены ураносодержащие пласты. Они залегают на глубинах 250–670 м и включают несколько стратиграфических горизонтов, которые подразделяются на мынкудукский, инкудукский и жалпакский горизонты [4, 17–19]. Эти породы сформировались в условиях озерно-аллювиальных и предгорно-аллювиальных равнин, где осадки откладывались в зависимости от изменений уровня воды и климатических условий.

Мынкудукский горизонт (K_2mk).

Мынкудукский горизонт залегают на глубинах 410–790 м и представляет собой слой, состоящий в основном из мелко- и среднезернистых светло-серых песков, которые сопровождаются прослоями алевролитов и глин. Этот горизонт является важным из-за наличия в его составе углефицированного органического вещества, а также сульфидов железа, что указывает на более высокие концентрации органики и минералов в этих осадках [1, 4]. Мощность горизонта варьируется от 0 до 30 м и в значительной степени зависит от географического положения и местных условий осадконакопления.

Инкудукский горизонт (K_2in).

Инкудукский горизонт залегают на глубинах 330–720 м и представляет собой разнозернистые и грубозернистые пески с прослоями мелко-среднезернистых песчаников и гравийных отложений [1]. Этот горизонт достигает мощностей 100–160 м и включает два подгоризонта, каждый из которых имеет свои характерные особенности. Важным аспектом является то,

что в состав этих отложений входят углефицированное органическое вещество и сульфиды железа, что подтверждает наличие водоемов с разными условиями осадконакопления. Кроме того, характерная пестроцветная окраска пород в разных частях горизонта указывает на разнообразные условия осадконакопления.

Жалпакский горизонт (K2gp).

Жалпакский горизонт залегает на глубинах 260–670 м и состоит преимущественно из красных среднезернистых песков с прослоями гравия и гальки. Эти породы были отложены в условиях более сухого климата, который характеризует поздний меловой период. Жалпакский горизонт имеет сложное стратиграфическое положение, поскольку в его кровле часто отмечаются угловые несогласия с более молодыми отложениями. Это делает его важным для понимания процессов седиментации и тектонической активности региона в позднем меловом и раннем палеогеновом периодах [1].

Палеогеновые отложения (P).

Палеогеновые отложения включают несколько горизонтов, среди которых наибольшее значение имеют уванасский, уюкский, иканский и интымакский горизонты. Эти породы залегают на глубинах 240–510 м и играют важную роль как водоупорные горизонты.

Уванасский горизонт (P_{11–2uv}).

Располагается в интервале глубин 240–510 м, при мощности 40–50 м. Его нижняя часть представлена светло-серыми и зеленовато-белесыми песками, содержащими линзы алевропелитов и лигнитов, а также отпечатки флоры. Это указывает на преимущественно континентальные условия осадконакопления, при которых происходило формирование ураносодержащих минерализаций. Подобные фации характерны для дельтовых или приозёрных систем с активным участием растительности [1, 4]. Верхняя часть горизонта представлена глинами и алевритами с характерной пестроцветной окраской и прослоями растительного детрита, что свидетельствует о дальнейшей аккумуляции в слабоокислительных условиях, при сохранении континентального режима.

Уюкский горизонт (P_{12–P₂₁yk}).

Залегает на глубинах 250–490 м и имеет мощность 40–60 м, демонстрирует переход к более устойчивым морским условиям. Он сложен серыми и тёмно-серыми глинисто-алевритовыми отложениями, содержащими костные остатки, чешую рыб и сульфиды железа. Эти признаки отражают формирование в условиях мелководного внутреннего морского шельфа, при пониженной скорости седиментации и слабой гидродинамике, что способствовало накоплению органического вещества и его дальнейшему преобразованию [1].

Иканский горизонт (P_{22ik}).

Продолжает морскую литогенетическую линию и представлен преимущественно карбонатными глинами, алевритами, мергелями и карбонатными песчаниками серо-чёрной и зеленовато-серой окраски. При мощности 30–50 м и глубинном залегании 200–450 м, он указывает на формирование в условиях углублённого морского бассейна с периодическими поступлениями обломочного материала. Прослой песков могут свидетельствовать о локальных фазах тектонического поднятия либо колебания уровня моря.

Уюкский и иканский горизонты формируют иканско-уюкский литолого-стратиграфический комплекс, отражающий морской этап осадконакопления, связанный с развитием внутреннего морского бассейна, обладавшего устойчивыми гидрогеохимическими условиями и способствовавшего накоплению как терригенного, так и карбонатного материала.

Интымакский горизонт (P_{22-31m}).

Он является самым мощным среди палеогеновых подразделений участка (140–170 м) и залегает на глубинах от 30 до 350 м. Представлен листоватыми морскими глинами серовато-зелёной окраски, содержащими прослой опоковидных пород [4]. Этот горизонт играл ключевую роль в формировании гидрогеологического строения региона, выполняя функции регионального водоупора. Он отделяет платформенную мел-палеогеновую и позднеальпийскую гидродинамические системы, что имеет важное значение при моделировании подземных водных потоков и оценке условий миграции ураносодержащих растворов.

Неогеновые отложения (N).

Неогеновые отложения месторождения включают бетпакдалинскую свиту и тогузкентскую толщу. Эти слои составляют верхнюю часть геологического разреза и представляют собой осадки, образовавшиеся в условиях активного тектонического движения региона [4].

Бетпакдалинская свита ($P_3^2-N_1^1$).

Достигает глубин до 180 м и характеризуется мощностью от 150 до 180 м. В её составе преобладают красно-коричневые и красные глины, обладающие плотной, массивной структурой и слабовыраженной карбонатностью. В породах наблюдаются включения мелкой гальки, зерен кварца, гравия и обломков кремнистых пород, что свидетельствует о разрушении и переработке более древних пород в условиях переменного климата. Красноцветность глин указывает на субаридные или аридные палеоклиматические условия с чередующимися фазами увлажнения и высушивания. Эти отложения, по всей видимости, сформировались в континентальной обстановке, при участии слабых потоков, слабо сортирующих материал [4, 17].

Тогузкентская толща ($N_1^2-N_2$).

Перекрывает бетпакдалинскую свиту, сложена преимущественно пролювиально-аллювиальными песчано-гравийно-галечными отложениями. В её составе присутствуют прослои песчано-карбонатных алевроитов и глин желтовато-серых и светло-коричневых оттенков. Эта толща отражает более динамичные условия седиментации, характерные для флювиальных и пролювиальных обстановок, связанных с активной денудацией и транспортом обломочного материала в условиях неотектонического поднятия. Местами породы характеризуются значительной зернистостью, с преобладанием крупного песка и гравия, что указывает на наличие в позднем неогене мощных потоков и временных водоемов, формирующихся на фоне усиленной тектонической активности [1, 4, 17, 19].

В пределах тогузкентской толщи выделяются локальные свиты: Аральская, Павлодарская, Асказансорская, Андасайская и Кеншагырская, которые представляют собой разновозрастные фациальные комплексы, формировавшиеся в различных условиях: от пролювиальных шлейфов до пойменных равнин и временных озер. Их развитие связано с фазами неотектонического подъема, деструкции субстрата и увеличения объема сносимого материала.

Четвертичные отложения(Q).

Четвертичные отложения составляют самые верхние слои геологического разреза и включают речные, эоловые и делювиальные осадки. Эти породы формируют современные ландшафты, включая речные долины, такыры и песчаные массивы. Мощность этих осадков варьируется от 5 до 10 м, но в конусах выноса предгорных участков их мощность может значительно увеличиваться. Четвертичные отложения играют важную роль в формировании современных гидрогеологических условий и ландшафтов на поверхности месторождения [1].

Литолого-стратиграфическая характеристика месторождения Буденновское, участок №2, представляет собой глубокий анализ геологических процессов, происходивших в регионе на протяжении миллионов лет. Каждый слой имеет свои особенности и значение для формирования урановых залежей, а также для понимания изменений климата и условий осадконакопления на протяжении различных геологических эпох.

2.2 Тектоника

Месторождение Буденновское расположено в западной части Сузакской впадины и характеризуется сложной тектонической структурой, сформированной под влиянием различных геодинамических процессов, включая

складчатость, разломную тектонику и воздымание блоков. Центральной структурной единицей района является Аксумбинская котловина, вытянутая в северо-западном направлении вдоль хребта Большой Каратау. Эта котловина, имеющая размеры 80×40 км, является основным структурным элементом района, который контролирует размещение осадочного чехла и распределение тектонических нарушений [3].

Район месторождения — западная часть Сузакской впадины. Центральную структуру района составляет Аксумбинская котловина, длиной — 80 км, шириной — 40 км, протянувшаяся по хребту Б. Каратау в северо-западном направлении с отметками кровли палеозоя до 600 м.

Формирование котловины связано с мезозойско-кайнозойскими субплатформенными процессами, наложенными на более древнюю палеозойскую и герцинскую тектоническую основу [1, 3]. Территория месторождения приурочена к внешней зоне каледонид и находится на стыке Чу-Сарысуйской субплатформенной депрессии и Каратауского рифтового поднятия. Это обуславливает наличие разновозрастных тектонических нарушений и блоков, имеющих различный геодинамический режим формирования.

Структурный план месторождения Буденновское определяется взаимодействием складчатых и разломных структур, сформировавшихся в различные геологические эпохи. На его территории выделяются крупные антиклинальные и синклинальные структуры, разломы глубокого заложения, а также относительно молодые тектонические деформации, связанные с активизацией горных поднятий в неоген-четвертичное время.

Аксумбинская котловина, являющаяся главной геологической структурой района, представляет собой депрессию, ограниченную с юго-запада горст-антиклиналью Большого Каратау, с запада — Даут-Бугуджильской седловиной, а с севера — Бугуджильским поднятием. Ее глубина достигает 600 м, что обусловлено значительным оседанием платформенного чехла над палеозойским основанием.

Котловина вычерчена с запада — Даут-Бугуджильской седловиной, с юго-запада — горст-антиклиналью Б. Каратау, с севера — Бугуджильским поднятием. Юго-западный борт ограничен Аксумбинским выступом, размер которого 6×2 км, прослеживающийся под чехлом в северо-восточную сторону на 20 км.

Характерной чертой современных структур служит конформность складок платформенного чехла и рельефа палеозойского основания [3, 4].

Структурно-тектоническая структура южного участка рудного поля месторождения Буденновское достаточно сложная и обусловлена её расположением на северо-западном погружении активно развивающегося горст-антиклинального поднятия хребта Б. Каратау.

Воздействие блоковых структур северо-западной («Каратауской») ориентировки, ограниченных продолжительными сдвиговыми разломами, отложенными в верхнем палеозое (возможно, даже раньше), на палеоморфологию древней поверхности выравнивания до верхнемелового

возраста характеризуется специфичностью, возрастая в юго-западном направлении по мере приближения к ГКР [1, 5].

На юго-западном борту котловины выделяется Аксумбинский выступ — тектоническая структура, протянувшаяся в северо-восточном направлении на 15–20 км и имеющая размеры 6×2 км. Данная структура играет важную роль в локализации рудных залежей, так как она контролирует распределение осадков и гидрогеологических условий в пределах месторождения [3, 4].

Даут-Бугуджилская седловина, замыкающая Сузакскую впадину с запада, представляет собой субмеридионально вытянутую поднятую структуру с абсолютной отметкой кровли палеозоя около 350 м. Эта структура служит границей между различными тектоническими блоками и влияет на характер разломной тектоники в районе.

Даут-Бугуджилская седловина представляет собой субмеридиональную поднятую структуру с абсолютной отметкой кровли палеозоя — 350 м.

Разломные структуры месторождения Буденновское представлены несколькими системами, из которых наиболее выраженными являются разломы северо-западного (СЗ) и северо-восточного (СВ) простирания.

Разломная тектоника в этом районе довольно распространена. Наиболее чётко выражены глубинные разломы северо-западного (Каратауского) простирания: Аксумбинский, ГКР и иные. Активация разломов в этом направлении с горизонтальными и вертикальными смещениями на сотни метров связана с поднятием горст-антиклинали в неоген-четвертичное время.

Наиболее крупными разломами северо-западного направления являются Главный Каратауский разлом (ГКР) и Аксумбинский разлом. Они формируют глубинные тектонические нарушения, вдоль которых происходили значительные вертикальные и горизонтальные перемещения пород, достигающие сотен метров [3]. Эти разломы имеют древнее происхождение, однако их активизация наблюдалась в неоген-четвертичное время, что связано с тектоническими воздыманиями горст-антиклинали Большого Каратау [1, 5].

На крайнем северо-востоке месторождения располагаются Жуантобинский и Центральный разломы. Эти структуры ограничивают с юго-запада Тастинское поднятие и служат границами крупных тектонических блоков, влияя на распределение осадочных толщ и гидрогеологических условий.

К анализируемой территории также относятся Центральный и Жуантобинский разломы, локализованные на крайнем северо-восточном участке и окаймляющие Тастинское поднятие с юго-запада.

Разломы северо-восточного простирания, такие как Даутский и Найманский, также играют значительную роль в тектонической эволюции района. Даутский разлом является границей между Даут-Бугуджилской седловиной и Аксумбинским выступом, что делает его важным элементом в структурном строении месторождения. Найманский разлом, пересекающий Буденновское месторождение, осложняет северо-восточный борт впадины, образуя приразломный желоб, в котором сконцентрированы осадочные породы различного возраста и литологического состава.

Наиболее значительными из разломов северо-восточного направления считаются Найманский и Даутский. Первая, пересекая месторождение Буденновское, усложняет северо-восточную сторону впадины в виде разломного желоба. Вторая отделяет Даут-Бугуджильскую седловину от Аксумбинского.

Кроме крупных региональных разломов, на территории выявлены второстепенные дизъюнктивные нарушения, играющие роль каналов флюидомиграции. Они выявлены по геофизическим данным (ВП, МТЗ, ГГК) и согласуются с данными структурного бурения. Такие нарушения ориентированы как в СВ–ЮЗ, так и в субширотном направлениях, и формируют сетку тектонического разбиения площади [4, 6].

Кроме того, в районе фиксируются сейсмотектонические проявления, связанные с постальпийской активизацией структур. Геофизические исследования указывают на наличие глубинных разломов, пронизывающих как палеозойское основание, так и осадочный чехол. Эти структуры играют важную роль в формировании фильтрационно-емкостных свойств коллекторов урановых руд и в миграции минерализованных растворов. Выраженная блоковая тектоника обуславливает мозаичное строение площади, что важно учитывать при моделировании залежей и планировании скважинной добычи методом ПВ.

2.3 Урановое оруденение

Буденновское месторождение располагается в пределах Шу-Сарысуйской урановорудной провинции, которая является частью Сырдарьинской впадины. Оно находится в западной части Сузакской впадины, где мощные толщи верхнемеловых осадков образуют благоприятные условия для накопления урана.

Основной рудоносный горизонт месторождения – нижеинкудукский подгоризонт – представлен проницаемыми песчано-алевритовыми отложениями, чередующимися с прослоями глин. Эти осадки накопились в условиях древних аллювиальных систем, формировавшихся вдоль предгорных равнин. По своей литологической характеристике рудовмещающие породы являются слабосцементированными кварцевыми песками и алевrolитами с различными типами цементации (глинистой, карбонатной, сульфидной).

Формирование уранового оруденения связано с процессами инфильтрационного окисления, которые протекали на протяжении длительного времени. Региональные фронты пластового окисления распространялись в проницаемых горизонтах, изменяя минералогический состав пород и формируя специфические рудные морфологии [4, 9].

Буденновское месторождение относится к урановым месторождениям инфильтрационного стратиформного типа, разрабатываемым методом подземного выщелачивания (ПВ). Такой способ является экономически и экологически оптимальным, поскольку позволяет извлекать уран без вскрыши пород и с минимальным воздействием на окружающую среду.

Разведанные запасы месторождения позволяют отнести его к крупнейшим в мире. Оно разделено на участки, в том числе Буденновское-2, Буденновское-3, Буденновское-4 и др., разработка которых осуществляется совместными предприятиями, такими как «Каратау» (совместное предприятие Казатомпрома и Росатома) и «АКБАСТАУ». Производство урана на этих участках ведется с начала 2000-х годов и составляет значительную долю от общего уранодобывающего потенциала Казахстана.

Рудоносные зоны месторождения Буденновское прослеживаются с севера на юг на расстоянии около 31 км – от северной границы (профиль 0) до Жабакольского профиля. При этом залежи обладают сложной и изменчивой морфологией, характерной для объектов стратиформного типа. Ширина рудных залежей варьируется и во многом определяется плотностью разведочного бурения. В наиболее изученной юго-западной части геологического отвода (где разведка проводилась с плотностью сети 200×50 м) ширина прямолинейных участков залежей в нижнеинкудукском подгоризонте достигает 400–500 м. Однако морфология залежей крайне фестончатая, что затрудняет точные оценки их параметров [1, 4].

Отдельные участки оруденения, так называемые «мешковые части», остаются недостаточно изученными. Эти структурные элементы представляют собой замыкания языков оруденения и тыловые выступы, которые могут достигать ширины 500–700 м. Их полное разбуривание пока не проведено, поэтому возможные запасы урана в этих участках нуждаются в уточнении. Из-за специфики формирования урановых залежей оценка их морфологических параметров на разрезах затруднена. Это связано с тем, что большинство геологических сечений оказываются «косыми» как по отношению к общему направлению рудоносной полосы, так и по отношению к локальной морфологии залежей (фестонам, языкам). Поэтому для достоверного определения параметров оруденения необходима комплексная интерпретация данных бурения и геофизических исследований.

Морфологическая сложность урановых залежей Буденновского месторождения обусловлена их генезисом. Они формировались под влиянием фронтов окисления, распространявшихся вдоль проницаемых горизонтов, что привело к образованию узких языков, фестонов и мешковидных тел, вытянутых в направлении движения окислительных процессов.

На участке №2 урановое оруденение наиболее полно представлено в пределах нижнеинкудукского подгоризонта, где выявлены протяжённые рудные тела, вытянутые вдоль древних аллювиальных каналов. Для этого участка характерна высокая степень литологической неоднородности, что обусловило формирование нескольких параллельных рудоносных языков с фестончатой и мешковидной морфологией [3, 8]. Специфическим признаком участка №2 является наличие хорошо выраженных зон редукции с активным накоплением урана в участках контакта окисленных и восстановленных пород. Здесь прослеживается закономерность: максимальные концентрации урана приурочены к зонам с высоким содержанием органического вещества и

тонкодисперсных сульфидов, что делает участок особенно перспективным с точки зрения промышленной добычи. Дополнительные геофизические исследования и уточняющее бурение в северо-восточной части участка №2 позволили выявить ранее неизвестные рудные линзы, что существенно расширяет геологическую модель оруденения. Рудные залежи представляют собой линзообразные или неправильной формы тела, состоящие из урансодержащих минералов, ассоциированных с гидроокислами железа и углекислыми соединениями. Концентрация урана в породах изменяется в зависимости от степени окисления и присутствия органического вещества. Наибольшие концентрации урана отмечены в участках, где происходит активное восстановление урансодержащих соединений [1, 4].

При этом залежи обладают характерной фестончатой морфологией, обусловленной неоднородностью окислительно-восстановительных условий в осадочных породах. В местах с повышенным содержанием органики и сульфидов железа наблюдается замедление процессов окисления, что приводит к формированию локальных рудных концентратов.

3 Изученность района

3.1 История освоения месторождения

Геолого-геофизическая изученность месторождения Буденновское, участок №2, имеет долгую и насыщенную историю, связанную с различными этапами геологоразведочных и добывающих работ. Важным этапом в этом процессе стали исследования, начавшиеся в 60-е годы XX века, когда специалисты «Волковгеология» начали активно исследовать юго-западную часть Шу-Сарысуйской депрессии в Южном Казахстане. Эти работы охватили не только непосредственно территорию месторождения Буденновское, но и соседние районы, где позднее были открыты такие известные урановые месторождения, как Инкай, Мынкудук и Акдала. Эти разведочные работы стали основой для создания масштабной геологоразведочной базы, позволившей в дальнейшем более точно оценивать перспективы развития урановой промышленности в регионе.

Ключевым моментом в истории открытия месторождения Буденновское стало бурение рекогносцировочного профиля XV в 1979 году экспедицией № 27 ВПГО. Именно тогда было открыто урановое оруднение на глубинах, превышающих 400 м, в мынкудукском и инкудукском горизонтах. Мынкудукский горизонт оказался относительно более тонким, с мощностью 20–40 м, а инкудукский горизонт – более мощным, достигая 100–150 м и разделяясь на два подгоризонта. Эти данные стали отправной точкой для дальнейших геологоразведочных работ, которые продолжались в течение нескольких десятилетий [4].

В период с 1984 по 1986 год экспедиция № 5 провела поисково-оценочные работы, сфокусировав внимание на геологической части северного участка месторождения. Результаты этих исследований подтвердили, что основной объем уранового оруднения сосредоточен в инкудукском подгоризонте на глубине до 700 м, что оказало значительное влияние на дальнейшее планирование работ. В 1991 году работы перешли к экспедиции № 7, которая в 1992 году пробурела разведочный профиль 1024 по геологическому заданию 7-23. Эти исследования позволили более точно оценить запасы урана по категориям C1 и C2, а также прогнозные ресурсы категории P1 [1].

Однако, несмотря на достигнутые успехи в геологоразведке, в 1993 году было приостановлено финансирование, что привело к прекращению работ на месторождении на протяжении более чем десятилетия. Этот перерыв в исследованиях в период с 1993 по 2005 год стал важным моментом, поскольку в это время произошли значительные изменения в структуре геологоразведочной и уранодобывающей отрасли Казахстана.

В 2005 году ТОО «Каратау» получило разрешение на проведение разведки уранового месторождения Буденновское на участке №2, что стало новым этапом в его изучении и разработке. В отличие от традиционных методов добычи, компания выбрала более современную технологию – подземное скважинное

выщелачивание, что позволяло повысить эффективность добычи и снизить экологическую нагрузку. В это время была реализована стратегия АО «НАК «Казатомпром», направленная на увеличение производства урана до 15 000 тонн к 2010 году.

С начала 2006 года компания приступила к строительству вахтового поселка и завода по переработке урана, что стало важным шагом в подготовке инфраструктуры для дальнейшей разработки месторождения. В 2007 году был осуществлен запуск процесса закисления технологических блоков, и началась опытная добыча, которая позволила извлечь 478 тонн урана. Эта опытная добыча позволила определить основные параметры работы и подготовить проект к промышленному запуску[3, 5].

С 2008 года ТОО «Каратау» приступило к промышленной эксплуатации месторождения, и с каждым годом объем добычи постепенно увеличивался. В 2008 году было добыто 675 тонн урана, а к 2010 году предприятие планировало выйти на проектную мощность в 2000 тонн урана в год. Эти планы совпали с динамичным ростом спроса на уран и его ролью в мировой энергетике, что позволило Казахстану укрепить позиции на рынке урана[3, 8].

На сегодняшний день разрешение на разведку, добычу и реализацию урана у ТОО «Каратау» остаётся в силе до июля 2040 года, что дает компании долгосрочные перспективы для продолжения добычи урана. По состоянию на 1 января 2023 года общий объем рудных запасов месторождения Буденновское составил 35,9 тыс. тонн урана, учитывая годовое истощение. Эта цифра подтверждает значительный потенциал месторождения и его важность для обеспечения потребностей внутреннего рынка и международного экспорта.

Перспективы развития месторождения Буденновское напрямую связаны с дальнейшим совершенствованием технологий добычи и переработки урана. Введение инновационных методов, таких как подземное выщелачивание, способно снизить издержки и повысить экологическую устойчивость процессов. В будущем также возможно внедрение новых технологий для более эффективного извлечения урана, включая модернизацию существующих скважин и разработку более совершенных методов мониторинга и управления добычей.

3.2 Геологическая изученность района

Геологосъемочные работы масштаба 1:200000.

Комплексное геолого-гидрогеологическое картирование Чу-Сарысуьской депрессии в масштабе 1:200000 в пределах исследованной территории проводилось в период с 1960 по 1973 г.г. . Первые геологосъемочные работы масштаба 1:200 000, ставшие основой для составления государственных геологических карт исследуемой территории, были проведены в 1960–1962 гг. (листы L-42-XXXII, XXVIII, XXXIII, K-42-III и IV) и в 1967–1973 гг. (листы L-42-XXII и XXXIV). Для уточнения стратиграфии мезозойских и кайнозойских

отложений использовались данные гидрогеологических скважин, пробуренных в рамках изучения ЧСД. Параллельно велась комплексная геолого-гидрогеологическая съёмка листа XXVIII (Б.Е. Комарницкий, Н.М. Салов).

Однако объём бурения в мезозойско-кайнозойских отложениях на данном этапе был незначительным — всего около 8000 п.м (55 скважин глубиной 150–250 м).

Карты масштаба 1:200 000, составленные в указанный период, отражают устаревшие представления о геологическом строении региона, особенно в части мезозойско-кайнозойского чехла. На смежных листах наблюдаются несогласованные стратиграфические подразделения и контуры распространения отложений. Главным недостатком работ стало ограниченное бурение — на основных листах (XXII, XXVIII, XXXIII, XXXIV) пробурено всего около 150 скважин [1, 5].

Со второй половины 1970-х годов начался новый этап — глубинное геологическое картирование, целью которого стало изучение как мезозойско-кайнозойских отложений, так и палеозойского фундамента.

Полное глубинное картирование было проведено только на листе XXVIII (Ю.В. Дмитровский, А.В. Крупченко, 1982–1988 гг.; С.М. Климов, 1990–1994 гг.). Основное внимание уделялось домезозойским образованиям. Мезозойско-кайнозойский чехол исследовался эпизодически, по опорным профилям, часто без отбора керна. Это ограничивает использование полученных данных для целенаправленного поиска пластово-инфильтрационных урановых месторождений.

С 1988 года исследования мезозойско-кайнозойского чехла центральной части ЧСД продолжены силами специализированной Волковской экспедиции (Н.Н. Петров и др.). Картирование охватило значительную часть территории к западу и северо-западу от основной площади (листы L-42-IX, XV, XXI, XX, XXVI, XXVII) [4].

Работы позволили уточнить геологическое строение как чехла, так и фундамента, и стали основой для последующего картографирования и прогнозной оценки ресурсов урана и других полезных ископаемых.

Глубинное геологическое картирование масштаба 1:200000

С 1988 по 1996 год на смежной территории, расположенной к западу и северу от исследуемой площади, были проведены масштабные работы по глубинному геологическому картированию. В результате этих работ:

- была составлена серия погоризонтных литолого-геохимических карт по семи горизонтам турон-сенонского и палеоцен-эоценового возраста;
- охвачена площадь около 32 тыс. км², включающая листы: L-42-IX (41, 42), XV, XX, XXI, XXVI, XXVII [5].

Созданный картографический материал включает: литолого-геохимические карты, геологическую карту поверхности домезозойских образований, структурно-тектонические карты домезозойского основания и мезозойско-кайнозойского чехла. В совокупности эти материалы образуют

трехмерную модель строения верхней части геологического разреза на глубины до 600–800 м [8].

Комплекс составленных карт и моделей используется как надежная основа для решения широкого спектра задач:

1. Прогноз и поиски рудных полезных ископаемых, включая: уран и попутные элементы (редкоземельные, скандий и др.), медь, свинец, цинк и другие виды оруденения в пределах средне-позднепалеозойского комплекса.
2. Обоснование народно-хозяйственного водоснабжения;
3. Оценка радиоэкологического состояния водоносных горизонтов;
4. Реконструкция палеогеографических и палеотектонических условий, изучение истории геологического развития мезозойско-кайнозойского времени;
5. Исследование геохимических условий и механизмов рудообразования.

К важнейшим результатам проведенных работ относится оформление Чу-Сарысуйской депрессии в качестве крупной потенциально-рудной иттриево-редкоземельной провинции, освоение которой, возможно, связано с применением прогрессивного способа ПВ.

3.3 Гидрогеологическая изученность района

Первые сведения о подземных водах Чу-Сарысуйской депрессии относятся к работам И. В. Мушкетова, Н. А. Северцева, С. С. Неустроева и В. Н. Вебера. В 1906–1908 гг. А. А. Козырев выполнил первые гидрогеологические исследования на территории Южной Бетпакдалы по заданию Министерства земледелия.

До 1950-х годов преобладали поисково-рекогносцировочные работы и съемки масштаба 1:500 000, бурились редкие и неглубокие скважины. Были выявлены основные артезианские бассейны и получены первичные данные по подземным водам.

В 1960–1970-е годы были выполнены съемки масштаба 1:200 000, выделены водоносные горизонты, оконтурены бассейны, изучены химический состав и гидродинамика. Основным недостатком — слабая стратиграфическая увязка и смешение горизонтов [1].

Для нужд сельского хозяйства пробурены сотни скважин в палеозойских, меловых, палеогеновых и неоген-четвертичных отложениях. В 1960-х гг. исследовалась возможность использования подземных вод как источника тепла (Жеваго, Алещенко, Бондаренко) и сырья для химической промышленности.

С конца 1970-х годов активно развивалось бурение для водоснабжения и оценки запасов. В 1979 г. Казгипроводхоз выполнил прогноз уровней водоносных горизонтов на 50 лет эксплуатации. Экспедиции Волковского ПГО пробурили более 1000 скважин, особенно детально изучены горизонты верхнего мела, палеоцена и эоцена [1, 4, 5]. Работы отличались высокой точностью, стратиграфической посадкой фильтров и качеством бурения. Гидрогеологические экспедиции Казгидрогеологии сыграли ключевую роль в открытии рудопроявлений (Канжуган, Кийская, Жуантобинская и др.). До 1990-

х гг. изучение радиационного состояния подземных вод было ограничено ураном, радием и радоном и не охватывало прилегающие к зонам окисления участки.

3.4 Геофизическая изученность района

Первым объектом для геолого-геофизического исследования в Чу-Сарысуйской впадине был Нижне-Чуйское поднятие в 1958 году, на котором было проведено сейсморазведочные работы КМПВ и гравиразведка с масштабом 1:200000. В первые годы работы проводились в рекогносцировочном характере и были нацелены на оценку исследуемой территории на её нефтегазоносность. Сейсморазведочные работы выполнялись по методу отраженных волн (МОВ) дали положительные результаты в сочетании с другими методами обусловили его устойчивое применение при изучении структурно-тектонических особенностей региона.

Широкомасштабные геофизические исследования были начаты в начале 60-х годов в связи с поисками нефти, газа, воды, урана и других полезных ископаемых. Работы проводились партиями Казгеофизтреста (КазГТ), объединений Южказгеология (ЮКТГУ) и "Волковгеология", Турланской (ТГФЭ), Илийской (ИГЭ), Центральной (ЦГЭ), геофизических экспедиций Института геологии НАК РК и других организаций [4].

Аэромагнитные работы были начаты в конце 1950-х годов и к 1962 году охватили всю территорию в масштабах 1:500000–1:100000. Аппаратура с феррозондовыми датчиками (АМФ) обладала низкой точностью, в связи с чем впоследствии все съемки были пересняты с применением ядерно-прецессионных магнитометров (ЯМП-3). С 1969 года проводилась аэрогеофизическая съемка (гамма-спектрометрия и магнитометрия) в масштабе 1:50000, результаты которой позволили построить карты магнитного поля, распределения радиоактивных элементов и суммарной радиоактивности.

Гравиразведочные работы проводились начиная с 1955 года в масштабах 1:200000 и 1:50000. Основные этапы охватили 1960–1984 гг., при этом наблюдения велись по сетям 500×500 и 1000×500 м [1, 5]. Были построены карты изоаномал в редукциях Буге и Фая, отражающие структурные особенности средне-верхнепалеозойских отложений.

Сейсморазведка (МОВ, КМПВ, МОГТ) велась с конца 1950-х годов и охватывала широкую территорию. Применялись новые методики (группировка приемников, промежуточная запись, аналоговая обработка), что повысило разрешающую способность и позволило картировать опорные отражающие горизонты. В 1974 году трестом «Спецгеофизика» проведены глубокие сейсмогеологические исследования с использованием обменных волн и глубинного зондирования, установившие наличие выступа поверхности Мохоровичича в пределах Чу-Сарысуйской депрессии.

В период 1972–1975 гг. и в 1987 гг. проводились опытно-методические сейсморазведочные работы, направленные на изучение разреза мезозойско-

кайнозойских отложений и решение ряда задач: определение глубины фундамента, трассировка разломов, уточнение морфологии горизонтов, оценка литологии и фильтрационных свойств.

Электроразведочные исследования, преимущественно методами ВЭЗ и ДЭЗ, использовались для картирования соленосных и высокоомных горизонтов нижнего карбона и девона, особенно в газоперспективных зонах. Однако с 1970-х годов значимость этих методов снизилась из-за их ограниченной точности, в то время как геофизические исследования в скважинах (КС, ПС) приобрели большее значение для литолого-стратиграфического расчленения слабодифференцированных пород мезозойско-кайнозойского возраста [1, 3, 5].

Ко времени начала работ по ГГК-200 ранее полученные материалы требовали переинтерпретации и согласования по единой методике, так как проводились в различных масштабах и разными исполнителями. Для этого были составлены сводные карты напряженности магнитного поля и изоаномал силы тяжести.

4 Методика геофизических работ, оборудование

4.1 Геологические задачи ГИС

Геологические задачи, решаемые с помощью геофизических исследований скважин (ГИС), охватывают широкий спектр задач, направленных на изучение геологического строения недр, поиски и разведку полезных ископаемых, а также контроль за их разработкой. Решаемые задачи с помощью ГИС:

- Литолого-стратиграфическое расчленение разреза
- Выявление коллекторов
- Поиск и разведка полезных ископаемых
- Оценка насыщенности флюидами
- Выявление зон изменения горных пород
- Контроль качества бурения и вскрытия пластов
- Геолого-экономическая оценка
- Обоснование направлений дальнейших геологоразведочных работ

4.2 Виды и объемы ГИС

Таблица 4.1 - Виды и объемы геофизических работ, выполненных при проведении поисково-оценочных и разведочных работ на участке 2 месторождения Буденновское

Виды геофизических исследований	Ед. измер.	Всего по участку	В т.ч. по годам и периодам разведки	
			1988-1990; 1992 г.	2005-2013 гг.
Поисково-разведочные скважины				
Гамма-электрокаротаж	п.м.	473714,6	51662,6	422052,0
	скв.	709	76	633
Инклинометрия	п.м.	473338,7	51282,0	422056,7
	скв.	709	76	633
Кавернометрия	п.м.	358714,6	5416,9	353298,0
	скв.	598	8	590
КНД-м	п.м.	2023,0	-	2023,0
	скв.	54	-	54
Гидрогеологические скважины				
Гамма-электрокаротаж	п.м.	7829,3	-	7829,3
	скв.	14	-	14
Инклинометрия	п.м.	7633,9	-	7633,9
	скв.	14	-	14
Кавернометрия	п.м.	5276,6	-	5276,6
	скв.	14	-	14

Индукционный каротаж	п.м.	4263,5	-	4263,5
	скв.	9	-	9
Термометрия	п.м.	5090,7	-	5090,7
	скв.	12	-	12
Токовый каротаж	п.м.	15040,5	-	15040,5
	скв.	14	-	14

Гамма-каротаж.

Физические основы.

Ядерные методы исследования скважин, применяемые при геофизических работах на месторождениях урана, подразделяются на две основные группы: методы изучения естественной радиоактивности (гамма-методы) и методы, основанные на регистрации искусственно вызванной радиоактивности, которые относят к ядерно-физическим или ядерно-геофизическим (например, гамма-гамма и нейтронные методы). Наиболее распространённым и информативным методом в изучении природной радиоактивности является гамма-каротаж (ГК), представляющий собой аналог полевой радиометрии, адаптированной для скважинных условий [9, 10]. Данный метод основан на регистрации интенсивности естественного гамма-излучения горных пород, обусловленного присутствием радиоактивных элементов, таких как калий-40 (K^{40}), уран-238 (U^{238}) и торий-232 (Th^{232}).

Гамма-каротаж позволяет определить среднюю концентрацию урана и мощность рудного тела в пределах пересечённого скважиной рудного интервала. В процессе ГК записывается непрерывная диаграмма распределения интенсивности гамма-излучения (I), выраженной в импульсах за минуту или в микроРентгенах в час (мкР/ч). Поскольку радиоактивный распад носит статистический характер, наблюдаются флуктуации измеряемых значений, для сглаживания которых проводят повторные записи при пониженной скорости спуска прибора [11]. Учитывая высокую степень поглощения гамма-излучения породами, эффективный радиус регистрации не превышает 0,5 м от оси скважины, при этом наличие обсадных труб может поглощать до 30 % гамма-квантов, а присутствие воды или бурового раствора дополнительно снижает чувствительность метода. Таким образом, конструктивные особенности скважины существенно влияют на достоверность измерений.

По радиационным свойствам породообразующие минералы условно подразделяются на четыре группы. К минералам с наибольшей радиоактивностью относятся соединения урана и тория (уранит, настуран, торианит, монацит, а также вторичные уранильные карбонаты, фосфаты и сульфаты). Минералы, содержащие калий-40 (полевые шпаты, калийные соли), характеризуются высокой радиоактивностью. Среднюю радиоактивность проявляют магнетит, лимонит и сульфиды, тогда как к низкорadioактивным породам относят кварц, кальцит, гипс и каменную соль [11, 13]. Радиоактивность между соседними группами отличается приблизительно на порядок.

Аппаратура и методика каротажа.

Аппаратура для гамма-каротажа конструктивно аналогична полевым радиометрам, но адаптирована для скважинного применения. Основным элементом измерительной системы является сцинтилляционный детектор, состоящий из кристалла NaI(Tl) и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), находящегося с ним в оптическом контакте. При попадании гамма-кванта в сцинтиллятор возбуждённые атомы и молекулы переходят в основное состояние с излучением фотонов, регистрируемых как вспышки света (сцинтилляции). Эти световые импульсы преобразуются ФЭУ в электрические сигналы, которые затем усиливаются с коэффициентом от 10^5 до 10^{10} . Для питания ФЭУ используется высоковольтный источник (около 2000 В), включающий генератор, выпрямитель и фильтр. Измерительная система радиометра также включает калибратор – генератор стандартных импульсов, применяемый для настройки и проверки работы прибора, в том числе для установки масштаба диаграмм ГК [10, 11]. Упрощённая блок-схема измерительного канала интегрального каротажного радиометра представлена на рисунке 4.1, где отображены основные функциональные элементы и принципы их взаимодействия в составе системы.

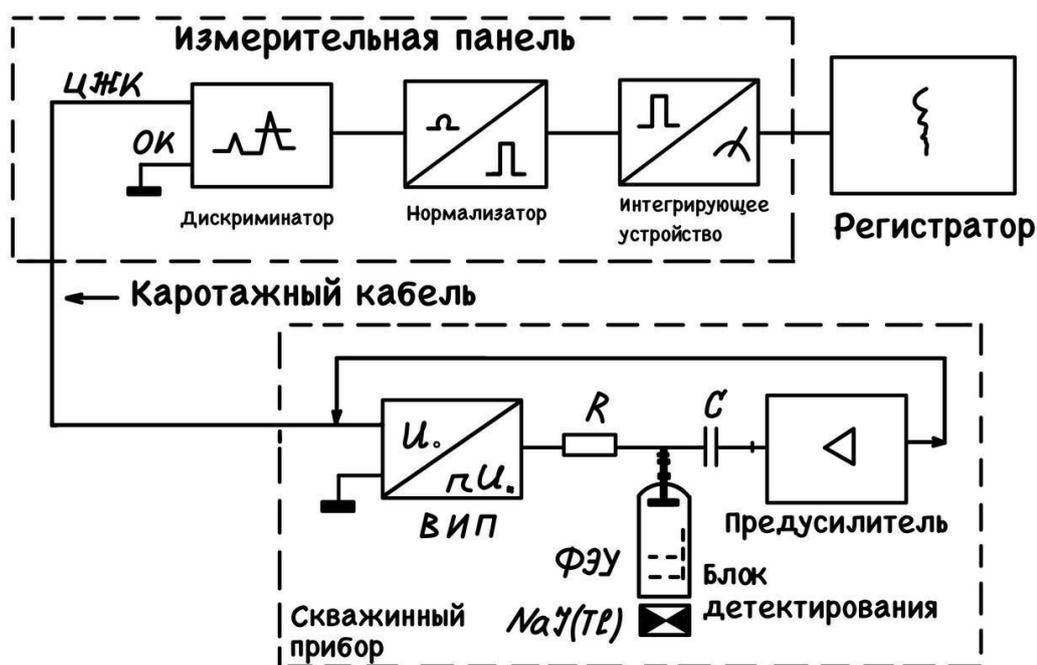


Рисунок 4.1 – Упрощенная блок-схема измерительного канала интегрального каротажного радиометра

Принцип работы аппаратуры.

Современные каротажные радиометры работают по спектрометрическому принципу, позволяя не только регистрировать интегральную интенсивность гамма-излучения, но и анализировать его энергетический спектр [10]. Энергетическая селективность обеспечивает возможность идентификации радиоактивных изотопов, например: K^{40} с энергией 1,46 МэВ, а также отдельных продуктов распада семейств U^{238} и Th^{232} . Аппаратурные спектры, представленные

в литературе (например, Г.Ф. Новиков, 1989), содержат характерные линии, используемые для определения источников радиоактивности в породах [13]. Использование трёхканальных спектрометрических систем с выделенными энергетическими окнами позволяет более достоверно связать зафиксированную активность с определёнными элементами и уточнить геохимические характеристики разреза.

Примером такой аппаратуры является комплексный скважинный прибор КСП-48МКС, конструкция и функциональные возможности которого показаны на рисунке 4.2. Он обеспечивает регистрацию как интегральных, так и спектральных характеристик гамма-излучения, что делает его незаменимым при изучении стратиграфически и геохимически сложных разрезов.



Рисунок 4.2 – Комплексный скважинный прибор КСП-48МКС

Недостатки метода.

На урановых месторождениях гидрогенного типа гамма-каротаж традиционно применяется как основной метод геофизического исследования скважин. Его данные широко используются при оценке запасов, поскольку позволяют рассчитывать такие параметры, как мощность рудных тел и среднее содержание урана. Однако метод ГК опирается на предположение о постоянстве коэффициента радиоактивного равновесия в руде (КРР), что не всегда соответствует реальности. Для гидрогенных урановых месторождений характерно естественное нарушение радиоактивного равновесия между изотопами урана и продуктами их распада, что может приводить к значительным погрешностям в расчётах запасов [10]. Кроме того, ГК не позволяет однозначно идентифицировать элемент-источник зафиксированной гамма-аномалии, поскольку регистрирует суммарную активность без изотопной селекции. В этих условиях дополнительную информацию можно получить путём кернового опробования, однако оно связано с высокими затратами, потерями материала и ограниченной воспроизводимостью.

Особенно актуален вопрос точной оценки ураносодержания при подземной выщелачивающей добыче урана, где содержание полезного компонента в продуктивной залежи подвержено постоянным изменениям. Для эффективного управления технологическим процессом требуется оперативный контроль за текущим содержанием урана в условиях его естественного залегания [9, 11]. Необходимо отслеживать промышленную ценность руды, различать кондиционные и забалансовые интервалы, а также вовремя выявлять зоны, утратившие выщелачиваемость. Учитывая ограничения метода ГК, для этих целей целесообразно применение комплексных геофизических подходов, включающих спектрометрические модификации ГК, нейтронные и гамма-гамма методы, а также методы прямого определения массовой доли урана в продуктах

фильтрации или бурового раствора. Такой подход позволит существенно повысить достоверность геолого-промышленной оценки рудных залежей и оптимизировать параметры подземного выщелачивания.

Методика.

При проведении геофизических исследований в скважинах на объекте использовался широкий спектр каротажной аппаратуры, обеспечивающей регистрацию гамма-излучения, электрофизических параметров и потенциалов естественной поляризации. До 1992 года ГРЭ-5 и ГРЭ-7 АО «Волковгеология» применяли каротажные станции типа СК-1-74. Эти станции обеспечивали выполнение полного комплекса скважинных геофизических исследований [11, 13]. После 2005 года работы выполнялись специализированной организацией ТОО «Геотехносервис» на современной аппаратуре, включая каротажные станции «Кобра-М», производимые МП «Сигма».

Гамма и электрокаротажные измерения проводились с использованием скважинных приборов типа КСП-54 (диаметром 54 мм), предназначенных для одновременной регистрации гамма-активности, кажущегося сопротивления и потенциалов естественной поляризации при одной спуско-подъемной операции. В данных приборах использовались кристаллы NaI(Tl) размером 30×70 мм в качестве детекторов гамма-квантов, что позволило увеличить количество регистрируемых импульсов, уменьшить накопительную емкость интеграторов и, как следствие, повысить скорость проведения гамма-каротажа по сравнению с приборами типа «Алмаз», имеющими меньшие кристаллы (18×30 мм). Наземный пульт УКП-77 (Универсальный комплексный прибор) был принят в качестве отраслевого стандарта при проведении поисков и разведки экзогенных пластово-инфильтрационных месторождений [10, 14].

С 2005 года работы выполнялись с применением аппаратуры БСК-051 и скважинных приборов КСП-60 (МП «Сигма»), по принципу регистрации аналогичных КСП-54, но с модернизацией в виде исключения RC-цепей и накопительных емкостей интеграторов благодаря использованию БСК-051 с ПВЭМ вместо УКП-77 и НО-65. Это позволило повысить скорость подъема прибора при сохранении достоверности измерений, в том числе и в зонах без детализированного рудного оконтуривания. При необходимости использовался прибор СПР диаметром 50 мм. Кристаллы NaI(Tl) в приборах КСП-54 и КСП-60 экранировались свинцовыми фильтрами толщиной 0,9–1,1 мм. Начальный энергетический порог регистрации устанавливался с применением моноэнергетических источников (таллий-204 или америций-241) и, как правило, составлял 18–23 кэВ, в пределах требований (не более 20 ± 5 кэВ). Радиометры градуировались ежеквартально с использованием стандартных источников серий Р-1, С-41 и GRa.6.1.P2 с содержанием радия-226 от 0,09 до 1,10 мг.

Разметка глубин на каротажных кабелях (КГ-3-60-90 и КГ3-0,75-90-150Оа) выполнялась с интервалом 10 м и ежеквартально контролировалась в обсаженных гидрогеологических скважинах максимальной глубины [9, 13]. Контрольные промеры проводились в присутствии представителей буровой и

геологической служб, результаты оформлялись в виде актов установленной формы.

Контроль качества гамма-каротажа проводился с особой тщательностью, поскольку на его основе рассчитывались запасы урана. Надежность и стабильность аппаратуры проверялись в первую очередь по результатам измерений от рабочего эталона – цилиндрического контейнера, содержащего зацементированный рудный материал, идентичный по геометрии используемому прибору. Измерения до и после каротажа сравнивались с опорными значениями, полученными после градуировки, и рассчитывались относительные расхождения Δ по формуле:

$$\Delta\% = (J_0 - J) \times 100/J_0; \quad (4.1)$$

где J_0 – эталонные показания;
 J – измерения до или после каротажа.

Допустимое значение Δ не должно превышать 10 %. В случае его превышения принимались оперативные меры по выявлению и устранению причин расхождений или производился повторный каротаж другим комплектом аппаратуры. Результаты регистрации от эталонов вносились в диаграммы или цифровые протоколы и журналировались в виде графиков, отслеживающих изменение чувствительности приборов во времени.

Среднеквадратическое отклонение (S) рассчитывалось по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - R)^2} / R \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

где R_i – результаты измерений до и после каротажа;
 R – эталонное значение;
 n – число измерений.

В течение всего периода работ величина S не превышала допустимого значения 7 %, соответствующего требованиям.

Дополнительно точность измерений проверялась путём контрольного гамма-каротажа, выполнявшегося другим комплектом аппаратуры или другим оператором (инженером или техником-геофизиком). Погрешности определялись по методу сравнения площадей и метропроцента аномалий с расчетом S по формуле выше. Объём контрольного каротажа составлял не менее 3 % от числа рудных скважин, и на участке 2 этот объём превысил 10 %, что соответствует и превышает требования нормативных документов.

Интерпретация полученных данных.

В зависимости от формы аномалии для определения границ рудного интервала по стволу скважины (видимой мощности) существуют следующие способы:

- способ $Z_{1/2}$, основанный на нахождении положения точек, в которых интенсивность гамма-излучения равна половине максимальной;
- способ J_z , основанный на нахождении положения точек, в которых интенсивность гамма-излучения равна заданному значению (способ заданной интенсивности);
- способ Z_0 , основанный на измерении крутизны крыльев гамма-каротажной аномалии. На рисунке 4.3 приведён пример выбора метода определения границ уранового оруденения по стволу скважины при плотности пород $\sigma = 2 \text{ г/см}^3$ и диаметре скважины $2r_0 = 136 \text{ мм}$. Сравнение подходов на конкретной аномалии позволяет обосновать наиболее адекватный способ интерпретации для различных геологических условий.

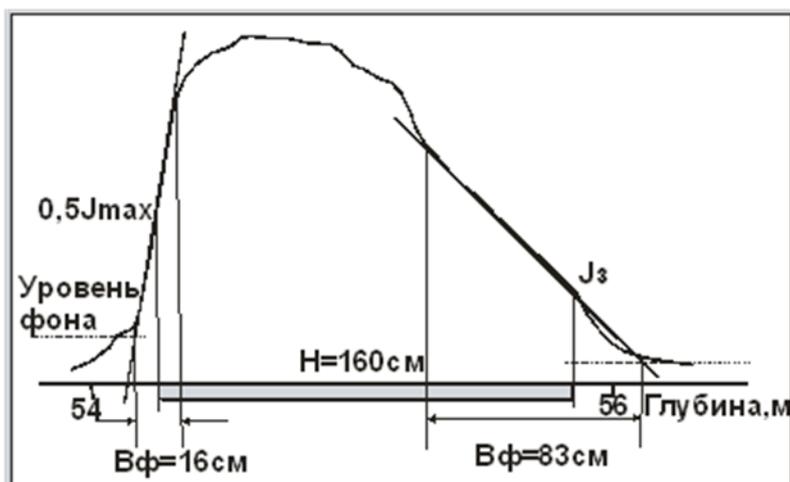


Рисунок 4.3 – Пример выбора способа определения границ уранового оруденения по стволу скважины: $\sigma = 2 \text{ г/см}^3$, $2r_0 = 136 \text{ мм}$

Подсчет площади аномалии ГК.

В площадь аномалии, полученную непосредственно по данным гамма-каротажа (S) одним из нижеприведенных способов, вводят поправки за свойства руд и условия измерения:

$$S(U) = (1 / K_{pp}) * [(S \cdot P) / (\Pi_б - \Pi_0 \cdot (1 - B))] \quad (4.3)$$

- где P – поправка за отжатие радона буровым раствором в пласт;
- $\Pi_б, \Pi_0$ – поправки за поглощение гамма-излучения в буровом растворе ($\Pi_б$) и обсадных трубах (Π_0);
- B – влажность руды;
- K_{pp} – коэффициент радиоактивного равновесия между ураном и радием.

Это необходимо для учёта влияния литологических и геометрических факторов, а также наличия ореолов забалансовых руд, которые могут исказить форму аномалии и затруднять интерпретацию.

На рисунке 4.4 приведён пример подсчёта площади аномалии гамма-каротажа, крылья которой осложнены ореолами забалансовых руд ($\sigma = 2 \text{ г/см}^3$; $2r_0 = 89 \text{ мм}$). Схема иллюстрирует необходимость введения поправочных коэффициентов при определении истинных границ и мощности рудного тела.

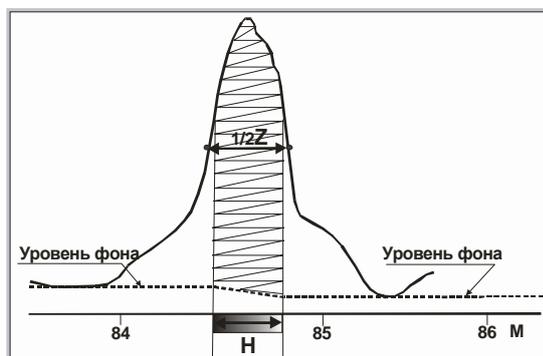


Рисунок 4.4 – Подсчет площади аномалии ГК, крылья которой осложнены ореолами забалансовых руд. $\sigma=2 \text{ г/см}^3$; $2r_0=89 \text{ мм}$

Определения содержания урана.

Содержание урана в рудах можно определить по данным ГК или КНД-м. В случае гамма-каротажа содержание урана определяется по радию при условии радиоактивного равновесия между ураном и радием или знания о коэффициенте радиоактивного равновесия.

Технология определения содержания урана по данным этих методов каротажа одинакова, поэтому здесь мы рассмотрим интерпретацию ГК, поскольку именно ГК является основным методом оценки параметров урановых руд при разведке и разработке месторождений урана.

Среднюю массовую долю урана в рудном интервале находят по формуле:

$$q = (S(Q) / (K_0 \cdot H)) \cdot q_0 \quad (4.4)$$

где $S(U)$ - площадь каротажной диаграммы [(мкР/ч) * см];

H – мощность рудного пересечения;

K_0 – пересчетный коэффициент, [мкР/(ч 0,01%U)];

q_0 – эквивалентный по интенсивности гамма-излучения вклад Th и K.

Нарушение радиоактивного равновесия в урановых рудах.

Нарушение радиоактивного равновесия в урановом ряду связано с процессами отдельной миграции U и продуктов его распада, а также с эманированием руд.

Миграция твердых продуктов распада урана определяется, главным образом, их химическими свойствами, а миграция радона (эманирование) связана с физическими процессами, определяющими его выделение из породы и движение по капиллярам и трещинам.

Количественно нарушение радиоактивного равновесия характеризуется коэффициентом радиоактивного равновесия K_{pr} , под которым понимают

отношение количеств данного изотопа к родоначальнику или предшествующему по ряду распада, причем количество обоих элементов выражают в единицах равновесного с ними урана. $K_{p.p.}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{p.p.} = (C(Ra) / C(U)) \times (1 / (3.4 \times 10^7)) \quad (4.5)$$

где q_{Ra} и q_U – соответственно массовые доли радия в единицах равновесного урана ($1 \text{ г } U = 3,4 \times 10^{-7} \text{ г } Ra$) и радия.

Миграция урана и продуктов его распада происходит по разным схемам. Уран переходит в водную среду при растворении урансодержащих минералов или при диффузии из горной породы в капиллярную воду. Элементы уранового ряда, образовавшиеся при распаде, могут накапливаться в воде капилляров. Дальнейшая миграция урана и продуктов распада зависит от условий перехода из капиллярной воды в гравитационную (свободную) воду. При благоприятных условиях, например, в окислительных средах, уран может дать устойчивые растворимые соединения и мигрировать на значительные расстояния. Радий растворяется, главным образом, в хлоридных водах.

Стандартный электрокаротаж (КС, ПС).

Электрокаротаж скважин в модификациях кажущихся сопротивлений (КС) и потенциалов естественной поляризации (ПС) являлся одним из основных методов геофизических исследований, применявшихся при поисково-разведочных работах на участке 2 месторождения Буденновское. До 1992 года электрокаротаж выполнялся с использованием подошвенного градиент-зонда типа М0.475А.0.05В, обладающего высокой разрешающей способностью при расчленении разреза. Его конструктивные особенности позволяют эффективно нивелировать влияние непостоянства зоны проникновения фильтрата бурового раствора, что обеспечивает устойчивые и достоверные результаты. Учитывая эти преимущества, данный зонд был принят в качестве стандартного для всех объектов месторождения, включая участок 2.

Начиная с 2005 года электрокаротаж скважин в тех же модификациях (КС и ПС) осуществлялся с использованием аппаратуры комплексного каротажа, установленной на базе каротажных станций СК-1-74 и «Кобра-М». Основными элементами измерительного комплекса являлись наземный пульт БСК-051 и скважинные приборы КСП-60, оснащённые градиент-зондом М0.95А0.1В. Применение данного оборудования позволило регистрировать при одной спуско-подъёмной операции три вида геофизических параметров: гамма-каротаж, кажущиеся сопротивления и естественную поляризацию, что способствовало повышению оперативности и технологичности исследований. После 2005 года регистрация данных осуществлялась в цифровом формате [3, 5].

Обзорный электрокаротаж выполнялся в масштабах 1:1000 и 1:200, в то время как детализационный электрокаротаж, проводимый в пределах рудовмещающего горизонта, осуществлялся в масштабе 1:50. Скорость проведения электрокаротажа согласовывалась со скоростью каротажа по гамма-

излучению, что обеспечивало сопоставимость данных различных методов при интерпретации.

Поскольку данные электрокаротажа использовались для количественной интерпретации, особое внимание уделялось контролю качества получаемых результатов. В процессе поисково-разведочных работ регулярно выполнялись контрольные измерения кажущихся сопротивлений с целью оценки точности и воспроизводимости метода.

Инклинометрия.

Инклинометрия скважин выполнялась с целью определения их фактического пространственного положения для точного построения геологических разрезов, определения координат рудных тел и расчёта истинных мощностей и залегания полезных ископаемых. Задача решалась путём измерения зенитных и азимутальных углов отклонения ствола скважины от вертикали. Измерения проводились с дискретным шагом 20 м с применением скважинных инклинометров КИТ-1, ИЭМ-36 и СИЭЛ-58, последний из которых обеспечивал непрерывную запись параметров. Работа выполнялась с использованием каротажных станций типов СК-1-74 и «Кобра-М».

Для контроля качества и достоверности получаемых данных на каждой пятой точке измерения дополнительно проводились повторные измерения в точках, расположенных на 2–3 м выше основной. Такие же контрольные измерения выполнялись в случае резкого изменения зенитного угла (в 2 и более раза по сравнению с предыдущей точкой), что позволяло своевременно выявлять и устранять возможные погрешности. Общий объём контрольных измерений составлял не менее 10 % от общего количества точек в каждой скважине. Анализ расхождений между основными и контрольными измерениями показал, что они не превышали допустимых значений, установленных нормативной документацией [1, 6].

Для обеспечения точности инклинометрических измерений проводилась регулярная градуировка приборов не реже одного раза в месяц на поверочном столе УСИ-2. При необходимости выполнялась настройка и балансировка измерительных систем приборов.

Количественная интерпретация данных инклинометрии заключалась в расчёте приращений по координатам X , Y и Z относительно устья скважины. Обработка выполнялась на ЭВМ СМ-1803 с использованием отраслевой программы и программного комплекса АИС «Рудник». Результаты инклинометрии использовались при построении геологических разрезов, нанесении контуров оруденения на планах и в расчётах координат кровли и подошвы рудных тел, что обеспечивало высокую точность пространственного позиционирования геологических объектов [7].

Каротаж по мгновенным нейтронам деления (КНД-м).

Физические основы.

Метод каротажа нейтронной деполяризации модифицированный (КНД-м) представляет собой одну из разновидностей импульсных нейтрон-нейтронных методов каротажа (ИННК), предназначенную для прямого определения

содержания урана-238 в продуктивных интервалах скважин. Основной физический принцип метода заключается в регистрации мгновенных нейтронов деления, возникающих преимущественно на изотопе урана-235 при облучении рудовмещающих пород потоком быстрых нейтронов, испускаемых импульсным генератором нейтронов с энергией 14,1 МэВ (реакция D+T). Поскольку в природе установлено постоянное изотопное соотношение между ^{235}U и ^{238}U (соответственно 0,7196 процентов и 99,274 процентов), определение мгновенных нейтронов деления от ^{235}U позволяет достоверно судить о содержании основного промышленного изотопа урана — ^{238}U [1, 5, 7].

Метод КНД-м выгодно отличается от гамма-каротажа (ГК) тем, что не зависит от степени радиоактивного равновесия в ураново-радиевом ряду, а следовательно, не требует введения поправочных коэффициентов ($K_{\text{пр}}$), обусловленных варьирующим содержанием дочерних радионуклидов — радия, тория и радиоизотопа калия. В связи с этим метод МН (мгновенных нейтронов деления), лежащий в основе КНД-м, обеспечивает прямую количественную оценку урана в скважинах и может применяться как в разведке, так и на стадии эксплуатации месторождений, особенно тех, где применяется подземное выщелачивание.

При облучении урановой руды импульсным генератором быстрых нейтронов, работающим в импульсном режиме, сразу после окончания нейтронного импульса в породе одновременно присутствуют первичные нейтроны генератора и мгновенные нейтроны деления, возникающие при делении ядер ^{238}U и ^{232}Th (порог реакции около 1,4 МэВ). Эти нейтроны замедляются за 100–200 микросекунд до тепловых энергий в результате взаимодействия с атомами горных пород. При этом тепловые нейтроны вызывают деление ядер ^{235}U , что сопровождается испусканием дополнительных мгновенных нейтронов со средней энергией порядка 2 МэВ. В скважинной методике регистрируются нейтроны, замедленные до надтепловых энергий (0,7–1,0 кэВ), в интервале 1,8 миллисекунды после каждого импульса. С целью исключения регистрации тепловых нейтронов, детекторы помещаются в кадмиевые экраны, эффективно поглощающие тепловые нейтроны.

Интенсивность регистрируемого сигнала зависит от множества факторов: мощности нейтронного генератора, пористости и влажности пород, плотности среды, присутствия нейтрон-поглощающих примесей, а также толщины обсадной колонны и наличия бурового раствора. Кроме того, важную роль играют конструктивные параметры самого зонда, в частности длина (L) и геометрия. Для обеспечения высокой точности измерений в методике КНД-м предусмотрено введение поправок на отклонения от эталонных условий, в которых проводилось калибровочное тарирование аппаратуры.

Программно-аппаратурный комплекс КНД-М.

Программно-аппаратурный комплекс проведения КНД-М (КНД-48/53) реализующий двухзондовую методику измерений параметров уранового оруденения, позволяет за одну операцию спуска-подъема получить следующие данные:

- При проходе снаряда к забою скважины осуществлять гамма-каротаж со скоростью до 600 м/ч, по которому выделяется рудный интервал.
 - При обратном ходе проводить КНД-М каротаж со скоростью до 50 м/ч, по результатам которого определяются следующие параметры:
 - Диапазон измерений массовой доли природного урана: 0,005 - 0,5 процентов;
 - Диапазон измерений массовой доли радия (в эквиваленте урана): 0,005 – 1 процентов;
 - Диапазон проницаемости, пористости с погрешностью ± 1 -2 процентов абс, глинистости с погрешностью определения, не превышающей погрешности их определения геологическими методами, влажности, измерение жизни нейтронов в пласте [4, 8].
- Рисунок 4.5 иллюстрирует измерительную аппаратуру КНД-М, используемую для каротажа и регистрации всех перечисленных параметров. Комплекс обеспечивает надёжность данных и высокую степень детализации рудного тела, что особенно важно при оценке стратиформного оруденения.

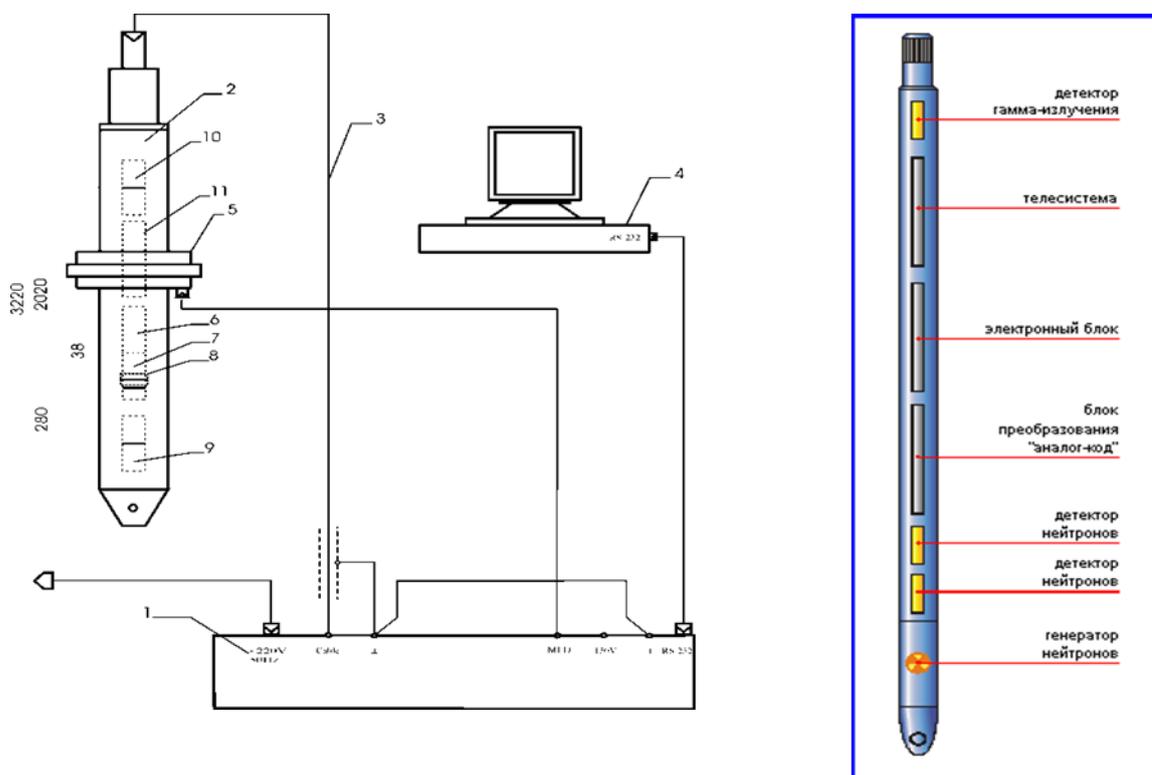


Рисунок 4.5 – Измерительная аппаратура КНД-М

Значительный прогресс в развитии метода КНД-м был достигнут внедрением двухзондовых скважинных систем, включающих дальний зонд тепловых нейтронов, реализующий классический ИННК для одновременной оценки влажности (W). Это позволило существенно повысить точность и стабильность интерпретации результатов в условиях изменчивых геолого-технических условий (ГТУ). Дополнительно, создание современной теоретико-вычислительной базы дало возможность учитывать трехмерную геометрию скважинного пространства, точные физико-математические модели переноса

нейтронов, как первичных, так и вторичных, а также детально моделировать чувствительность зондов к различным ГТУ [20].

Результатом этих достижений стало формирование обширных палеточных баз данных зависимости показаний зондов КНД-м от совокупности параметров среды. На их основе разработано современное программно-интерпретационное обеспечение (ПИО), обеспечивающее высокоточную и физически обоснованную интерпретацию измерений. Всё это позволило модернизировать методику КНД-м и превратить её в эффективный и надёжный инструмент количественной оценки ураносодержания пород при разведке и эксплуатации урановых месторождений, в том числе гидрогенного типа.

Эффективность применения двухзондовой схемы подтверждается сравнением результатов анализа керна скважин с результатами КНД-М [4, 8]. На рисунке 4.6 приведены данные, полученные при использовании прибора КНД-53 в двухзондовом стандарте, где наблюдается высокая степень соответствия лабораторных и каротажных значений. Для сопоставления на рисунке 4.7 показаны результаты, полученные при применении прибора в однозондовом стандарте — разница в точности и детализации интерпретации хорошо иллюстрирует преимущество модернизированных комплексов.

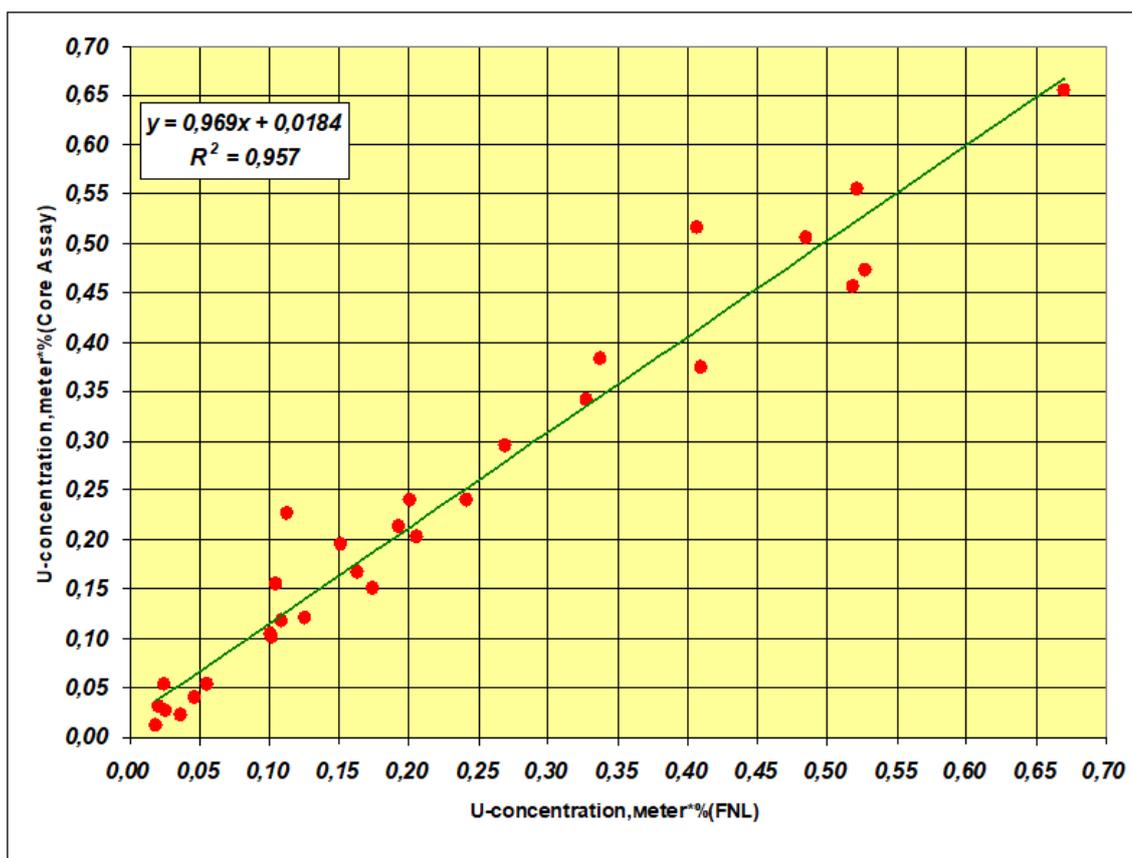


Рисунок 4.6 – Сравнение результатов анализа керна скважин и результатов измерений КНД-М (применен прибор КНД-53 в двухзондовом стандарте)

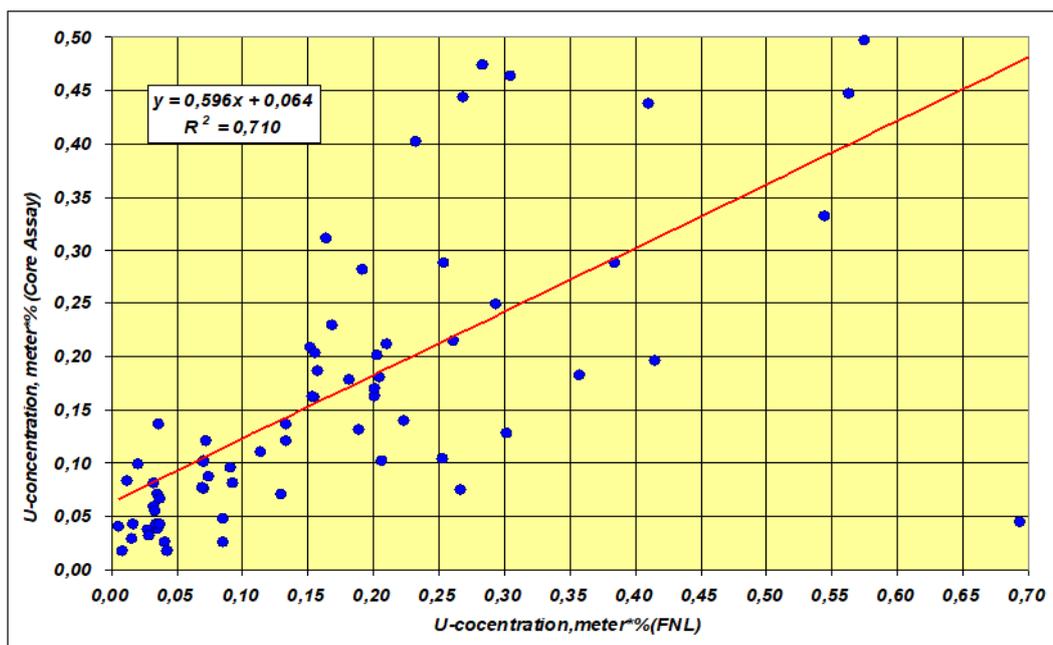


Рисунок 4.7 – Сравнение результатов анализа керн скважин и результатов измерений КНД-М (применен прибор в однозондовом стандарте)

Методика.

На современном этапе каротажные работы методом нейтронной деполяризации (КНД-м) на участке 2 месторождения Будённовское выполнялись по однозондовой методике с использованием аппаратного комплекса АИНК-60, установленного на серийной каротажной станции типа «Кобра-М». В состав комплекса входили установка АИНК-60 и скважинный прибор АИНК-60 диаметром 60 мм, наземный пульт управления, блок питания, блок градуирования, а также соединительные кабели. При этом при использовании станции «Кобра», оснащённой блоком питания и согласования скважинных приборов БСК-051М, наземный пульт и блок питания не задействовались [4].

Скважинный прибор АИНК-60 включает в себя импульсный нейтронный генератор ИНГ-101Т, кольцевой блок мониторов нейтронного потока (БМ), блок детектирования мгновенных нейтронов деления (БД), блок регистрации гамма-излучения (БГК), а также центральный процессорный модуль (ЦП), управляющий всеми узлами, осуществляющий сбор и первичную обработку данных от БД, БМ и БГ, и обеспечивающий связь с наземным оборудованием через модем. Нейтронный генератор состоит из вакуумной нейтронной трубки ТНТ-1411, размещённой в блоке ИНГ-101ТБТ, и высоковольтного блока питания. Блок мониторов выполнен в виде цилиндра из бора и содержит восемь счётчиков $\beta+\gamma$ -излучения СБМ-21, по четыре в каждом канале (М1 и М2), причём детекторы канала М2 экранированы свинцом. Блок детектирования основан на счётчике медленных нейтронов СНМ-18-1, окружённом органическим стеклом толщиной 6 мм и кадмиевым экраном толщиной 1 мм. БГК выполнен на основе монокристалла NaI(Tl) размером 30×40 мм. Наземный пульт управления содержит модем и процессорный модуль, обеспечивающий предварительную

обработку сигналов от СП, БГ, датчиков глубины и меток, а также обмен данными с бортовым ПК станции через интерфейс RS-232. Блок питания обеспечивает стабилизированное питание СП и БГ постоянным напряжением 150–190 В при токе до 300 мА. Выносной блок градуирования из органического стекла служит для градуировки блока мониторов и содержит четыре параллельно включённых счётчика СБМ-20 [1, 5].

Программное обеспечение комплекса АИНК-60 состоит из трёх уровней: встроенного ПО скважинного прибора, ПО наземного блока процессора, загружаемого при запуске, и рабочей программы, устанавливаемой на ПК с установочного диска. Последняя включает файлы N.LAV и N.LAS с индивидуальными результатами заводской градуировки. При адаптации временного режима работы АИНК-60 под стандарты комплекса ТСКУ-91 с прибором СПМ-60 была разработана обновлённая версия программного обеспечения. Она включает программу градуировки GRNAINK, программу проведения каротажа ZAPAINK, расчётную программу коэффициента А ARPAINK, интерпретационную программу INNAINK и графический модуль GRKAINK.

Контрольно-поверочные работы проводились с использованием источников ИБН-20 (плутоний-бериллиевый, $n \times 10^5$ н/с) и радиевого источника ЕР-14 GRаб.1.P2 с активностью 1,02 мг экв. Ра. Каротаж скважин проводился в режиме непрерывной записи с одновременной регистрацией плотности потока нейтронов и мощности гамма-излучения. Скорость подъёма прибора не превышала 30 м/ч, при этом шаг квантования составлял 10 см [4, 6].

Качество работы аппаратуры контролировалось на основании воспроизводимости параметров при градуировке и поверках до и после каротажа. По результатам измерений за период эксплуатации (2008–2012 гг.) установлено, что изменение чувствительности блоков детекторов В'кн не превышало 2 процентов (при допустимом 3 процентах), изменение коэффициентов чувствительности нейтронных детекторов (β_1 и β_2) находилось в пределах ± 7 процентов (при норме ± 10 процентов), отклонение скорости счёта гамма-излучения от источника ЕР-14 составляло не более ± 5 процентов, а отношение $M_{\gamma 1}/M_{\gamma 2}$ — от 1,8 до 2,0 (при допустимом интервале 1,6–2,0), что свидетельствует о стабильной работе комплекса.

Интерпретация данных КНД-м включала расчёт содержания урана и радия по каждому 10-сантиметровому прослою в пределах рудного интервала. Расчёт содержания радия выполнялся автоматически на борту станции с применением алгоритмов, аналогичных методике гамма-каротажа. Методика расчёта содержания урана и выделения рудных границ достаточно сложна и подробно описана. Условная граница рудного интервала определялась по пороговой бортовой концентрации урана 0,01 процентов, а среднее содержание урана в рудном интервале вычислялось как среднее арифметическое по элементарным прослоям [1, 5].

Важнейшими задачами метода КНД-м являлись радиологическое изучение месторождения и совершенствование интерпретации данных гамма-каротажа.

Также методом КНД-м решалась задача внешнего контроля достоверности параметров рудных тел, определённых по данным геологического опробования и гамма-каротажа.

Кавернометрия.

Кавернометрические исследования на месторождении проводились с целью определения фактических диаметров скважин, вскрывших урановое рудное пересечение, что необходимо для корректного расчёта поправочных коэффициентов при интерпретации данных гамма-каротажа. До 1989 года кавернометрия выполнялась выборочно не менее чем в 10 процентов таких скважин, в то время как с 2005 года – во всех (100 процентов) скважинах, вскрывших продуктивные урановые интервалы. Работы выполнялись с использованием каверномеров типов КМ-2 и СКУ. Запись результатов до 2005 года осуществлялась на ленточные самописцы типов НО-15 и НО-65, а после 2005 года — в цифровом виде при помощи аппаратуры станции «Кобра-М» [4].

Съёмка кавернометрических кривых проводилась в двух масштабах: от устья до кровли продуктивного горизонта — в масштабе 1:200, в пределах продуктивного горизонта — в масштабе 1:50. Для обеспечения достоверности измерений градуировка каверномеров выполнялась индивидуально для каждой скважины перед началом и после завершения каротажных работ с использованием эталонировочных колец соответствующего диаметра. Скорость каротажа при выполнении кавернометрии не превышала 1500 м/ч.

Полученные кавернометрические данные использовались для определения фактических диаметров ствола скважин, на основании которых производилось уточнение поправочных коэффициентов, необходимых при интерпретации результатов гамма-каротажа в зонах с изменённым диаметром ствола [1, 4].

Термометрия.

Термометрические измерения проводились в гидрогеологических скважинах с целью определения положения цементного кольца (ЦК) в затрубном пространстве. Работы выполнялись в соответствии с требованиями «Технической инструкции по проведению геофизических исследований в скважинах» (редакции 1985 и 2010 гг.). Измерения осуществлялись по истечении 18–24 часов после завершения цементации скважин. Количественная интерпретация по результатам термометрии не проводилась [1].

В период до 2005 года для проведения измерений применялся электротермометр ЭТС-2У, а после 2005 года — прибор КТ-4м. Глубины регистрировались в масштабе 1:200. Запись термограмм производилась при спуске скважинного прибора с максимальной скоростью не более 300 м/ч.

4.3 Метрологическое обеспечение работ

Основной целью метрологического обеспечения геофизических исследований скважин (ГИС) является повышение эффективности и качества проводимых работ за счёт обеспечения единства измерений и достижения

требуемой точности получаемых результатов в пределах, регламентированных действующими нормативными документами. Единство измерений и соответствие результатов установленным требованиям точности в процессе выполнения геофизических работ достигаются посредством применения ряда технических и организационных мероприятий [4, 6].

Прежде всего, в процессе выполнения измерений используются только те средства измерений, которые прошли испытания на признание типа и метрологическую аттестацию в соответствии с требованиями Государственной системы обеспечения единства измерений, действовавшими на момент проведения работ. Все применяемые приборы подлежат своевременной поверке в организациях, имеющих соответствующую аккредитацию и право на выполнение метрологических работ (Таблица 4.2).

Для обеспечения стабильности метрологических характеристик геофизического оборудования проводится регулярная (ежеквартальная) градуировка измерительной аппаратуры с использованием стандартных источников гамма-излучения на основе изотопа Ra-226 серий PA, C и GRa 6.1.P2 с активностью 1,10 мг и 0,096 мг. При этом выполняется настройка нижнего энергетического порога регистрации гамма-излучения на уровне (20 ± 5) кэВ, а также осуществляется проверка линейности и определение нелинейности градуировочных характеристик. Указанные работы выполнялись специализированным подразделением ТОО «Геотехносервис» — геофизическим цехом номер 1 [4].

Дополнительно обеспечивается контроль работоспособности средств измерительной техники перед началом каждой серии измерений, включая визуальную и функциональную проверку оборудования. Также в рамках метрологического контроля осуществляются контрольные измерения в соответствии с установленными нормативными требованиями.

В состав системы метрологического обеспечения ГИС методом гамма-каротажа входят следующие основные элементы: стандартные радиевые источники гамма-излучения серий PA, C и GRa 6.1.P2; градуировочная установка типа УПЛ; контрольно-поверочная скважина № 6789гф. Все эти компоненты обеспечивают воспроизводимость измерений, необходимую точность регистрации гамма-излучения и возможность оперативной оценки корректности работы измерительных систем, что в совокупности гарантирует достоверность получаемых геофизических данных и позволяет использовать их в целях геологической интерпретации, подсчёта запасов и оценки параметров продуктивных интервалов [18].

Таблица 4.2 - Сведения о геофизической аппаратуре и оборудовании

Наименование применявшихся средств измерений	Тип, марка	Класс точности	Пределы измерений	Цель проводившихся измерений	Точность измерений	Проводившиеся мероприятия по обеспечению заданной точности измерений
Наземная и скважинная геофизическая аппаратура						
Гамма-каротаж						
Универсальный комплексный прибор	УКП-77	4,0	0-10000 мкР/ч	Для измерения естественной радиоактивности горных пород по оси скважины глубиной до 1500 м в комплекте с каротажной станцией СК-1-74, "Кобра-М"	7%	Ежегодные, периодические, ведомственные в соответствии с ГОСТ 8.513 ежемесячные градуировки приборов по образцовым источникам излучения радий-226 Сертификат СИ РК №5278 от 15.05.2009 года
Блок скважинный каротажа	БСК-051	4,0	0-10000 мкР/ч		7%	
Комплексный скважинный прибор	КСП-54 КСП-60	4,0	0-10000 мкР/ч		5%	
		4,0	0-10000 мкР/ч	5%		
Инклинометрия						
Инклинометр, наземный пульт	КИТ	4,0	0-50° – зенитный 0-360° - азимутальный	Для определения зенитного и азимутального углов искривления необсаженных скважин	30' угол зенитный ±4° по азимуту	Ежемесячные проверки на УСИ-2 Сертификат СИ РК №6013 от 22.02.2010 года
Инклинометр, скважинный прибор	КИТ СИЭЛ-58	4,0				
Установочный стол инклинометра	УСИ-2	4,0	0-90° – верт. угол 0-360° - азимут	Для поверки инклинометров	6' – угол 60'- азимут	Ежегодная госповерка
Кавернометрия						
Каверномеры малогабаритные	КМ-2. СКУ	4,0 4,0	40-400 мм 40-400 мм	Для определения диаметров скважин	5 мм	Ежегодные ведомственные проверки Сертификат СИ РК № 6471 от 31.08.2010 года

5 Анализ и оценка поправок и зависимостей

5.1 Оценка достоверности результатов гамма-каротажа

Основной целью являлось выявление причин систематического переизвлечения урана при подземном выщелачивании, наблюдавшегося, по предварительным оценкам, на не менее чем 70 % технологических блоков, введённых в эксплуатацию с 2007 года. Проведение исследований предусматривало реализацию двух этапов. На первом этапе осуществлялись сбор, систематизация и верификация исходной информации, включая уточнение данных, содержащихся в базе данных АО «Атомгео» по скважинам рудника (в частности, местоположение, тип, наименование и идентификационные параметры), а также предварительная оценка корректности применения расчетных параметров при подсчете рудных интервалов, в первую очередь – оценка адекватности использованных радиологических поправок в данных гамма-каротажа [1, 2].

На втором этапе была реализована основная задача проекта – выбор и обоснование подхода к корректировке применяемых радиологических поправок, проведение массовой переоценки запасов по технологическим блокам с последующей коррекцией движения запасов по категориям (в том числе по балансовым, вскрытым и подготовленным к отработке), а также оформление итогового технического отчета с представлением результатов заказчику. Уже в начальной фазе работ было установлено, что ключевая причина переизвлечения урана заключается в систематической недооценке запасов, учтённых по каждому из технологических блоков. Вместе с тем, следует отметить, что существующая методика обработки данных ГК, включая алгоритмы ввода поправок и расчёта параметров рудных интервалов, является строго формализованной, автоматизированной и допускает вариативность исключительно в части учета морфологической принадлежности рудных тел. В этой связи, на первоначальных этапах исследования использовались только методы переинтерпретации морфологических типов рудных тел без изменения значений коэффициента радиологической редукции (K_{pp}) [1, 4].

Ключевым методическим и организационным моментом стало принятие решения о необходимости пересмотра значений K_{pp} , ранее принятых и использовавшихся в расчётах ТОО «Каратау». Учитывая, что в распоряжении предприятия находилась единственная база данных по результатам керновой аналитики, применяемая в качестве исходной при построении зависимости K_{pp} от содержания радия и массовой доли урана, возникла необходимость в критическом переосмыслении достаточности этой базы для обеспечения достоверности поправочных коэффициентов. В рамках указанной задачи была поставлена и реализована двухфазная цель: во-первых, продемонстрировать недостаточность или неполноту существующей базы данных для корректного расчёта K_{pp} , и, во-вторых, оценить возможность ее расширения за счёт включения данных по нейтронно-деполяризованному каротажу (КНД),

выполненному в эксплуатационных скважинах технологических блоков. Обоснование допустимости и эффективности использования результатов КНД в качестве дополнительного источника информации для пересчета коэффициентов K_{pp} стало методологической основой, позволившей реализовать качественную переоценку запасов и выявить причины систематической недоучетности, обусловившей переизвлечение урана при добыче [4, 5].

Достоверность определения радиологических поправок, применяемых при интерпретации гамма-каротажа (ГК), напрямую влияет на точность самих каротажных данных и, в итоге, на достоверность оценки запасов урана. Контроль точности интерпретации ГК традиционно осуществляется путем сопоставления параметров рудных интервалов (РИ), полученных по данным ГК, с результатами геологического (кернового) опробования. Аналогичный анализ был выполнен в отчете [1], однако он основан на ограниченной выборке и характеризуется рядом методических недостатков. Несмотря на это, достоверность результатов, приведенных для указанной выборки, не вызывает сомнений. В то же время выявлено статистически значимое занижение средней массовой доли урана по ГК по отношению к данным кернового опробования, не отраженное в отчете. Установленное расхождение составляет 7 процентов при значении t-статистики 4,77, что превышает критическое значение $t_{кр.}^{(2)} = 2,59$ при уровне значимости $P = 99$ процентов.

Основными методологическими недостатками оценки, выполненной в отчете [1], следует считать отклонение от требований Инструкции по ГК, согласно которой сопоставление должно проводиться по различным морфологическим типам руд (в рассматриваемом случае — «мешки» и «крылья»), а также с обязательным выделением не менее трех классов содержания урана — бедные, рядовые и богатые руды. Указанные требования в отчете соблюдены не были. В связи с этим был проведён более детализированный анализ достоверности интерпретации ГК на той же выборке, но с обязательным разделением по морфологическим типам руд и классам содержания урана; результаты для мешков сведены в таблицу 5.1 — «Результаты сопоставления параметров рудных интервалов для мешков».

Результаты сопоставления, выполненного по морфологическим типам и классам содержаний, показали следующее. Для выборки бедных руд в пределах морфологического типа «мешки» выявлено завышение стволовых запасов по ГК на 11 процентов по сравнению с опробованием. Однако, ввиду высокой дисперсии данных и ограниченного количества РИ (всего 7), статистическая значимость расхождения отсутствует. При этом бедные руды характеризуют менее 1 процентов суммарных запасов в данной выборке. Для класса рядовых руд наблюдается тенденция к занижению массовой доли урана по ГК на 7 процентов при допустимом уровне случайных расхождений, с проявлением статистической значимости по t-критерию. В выборке богатых руд (около 50 процентов от общей продуктивности) выявлено устойчивое и статистически значимое занижение массовой доли урана и средних стволовых запасов по ГК

относительно опробования на 6,4 процента и 6,1 процента соответственно, при этом случайные расхождения остаются в пределах допустимых значений [1, 4] .

Талица 5.1 - Результаты сопоставления параметров рудных интервалов для мешков

Сопоставляемые параметры: мощность- <i>m</i> ; стволовые запасы – <i>mC</i> ; содержание - <i>C</i> ;	Ед. изм.	Значения сопоставляемых параметров		Относит. расхожд. (%)	Значимость систематических расхождений		Средние квадратические отклонения	
		ГО	ГК		<i>t</i> _{расч.}	<i>t</i> _{табл.}	<i>S</i> _{допус.}	<i>S</i> _{факт.}
Класс содержаний урана до 0,03% (бедные руды)								
Количество интервалов	инт.	7	7					
Суммарная мощность	п.м.	12,70	13,60					
Средняя мощность	м	1,81	1,94	7,1	2,46	2,36	±25см	±12,8 см
Суммарные стволовые запасы	м%	0,33	0,37					
Средние стволовые запасы	м%	0,048	0,053	11,1	0,99	2,36	±25%	±41,4%
Средние содержания	%	0,0263	0,0273	3,7	1,46	2,36		
Класс содержаний урана 0,03-0,10% (рядовые руды)								
Количество интервалов	инт.	68	68					
Суммарная мощность	п.м.	339,20	339,10					
Средняя мощность	м	4,99	4,99	0,0	0,1	2,0	±25см	±8,9 см
Суммарные стволовые запасы	м%	23,85	22,11					
Средние стволовые запасы	м%	0,351	0,325	-7,3	0,99	2,0	±25%	±19,5%
Средние содержания	%	0,0703	0,0625	-7,3	2,07	2,0		
Класс содержаний урана более 0,10% (богатые руды)								
Количество интервалов	инт.	36	36					
Суммарная мощность	п.м.	176,50	177,10					
Средняя мощность	м	4,90	4,92	0,3	0,76	2,03	±25см	±9,3 см
Суммарные стволовые запасы	м%	25,99	24,41					
Средние стволовые запасы	м%	0,772	0,678	-6,4	2,92	2,03	±25%	±17,5%
Средние содержания	%	0,0703	0,0625	-6,1	2,61	2,03		

Таблица 5.2 - Результаты сопоставления параметров рудных интервалов для крыльев

Сопоставляемые параметры: мощность-м; стволовые запасы – мС; содержание - С;	Ед. изм.	Значения сопоставляемых параметров		Отно- сит. рас- хожд. (%)	Значимость систематических расхождений		Средние квадратические отклонения	
		ГО	ГК		t _{расч.}	t _{табл.}	S _{допус.}	S _{факт.}
Класс содержаний урана до 0,03% (бедные руды)								
Количество интервалов	инт.	14	14					
Суммарная мощность	п.м.	15,20	14,50					
Средняя мощность	м	1,09	1,04	-4,6	2,19	2,14	±25см	±6,8 см
Суммарные стволовые запасы	м%	0,33	0,46					
Средние стволовые запасы	м%	0,024	0,033	39,8	4,22	2,14	±25%	±39,6%
Средние содержания	%	0,0216	0,0317	46,5	4,13	2,14		
Класс содержаний урана 0,03-0,10% (рядовые руды)								
Количество интервалов	инт.	129	129					
Суммарная мощность	п.м.	306,50	304,60					
Средняя мощность	м	2,38	2,36	-0,6	1,1	1,98	±25см	±10,8 см
Суммарные стволовые запасы	м%	20,04	20,18					
Средние стволовые запасы	м%	0,155	0,156	0,7	1,24	1,98	±25%	±21,5%
Средние содержания	%	0,0654	0,0662	1,3	0,71	1,98		
Класс содержаний урана более 0,10% (богатые руды)								
Количество интервалов	инт.	72	72					
Суммарная мощность	п.м.	162,30	159,40					
Средняя мощность	м	2,25	2,21	-1,8	2,66	1,99	±25см	±9,5 см
Суммарные стволовые запасы	м%	26,89	22,94					
Средние стволовые запасы	м%	0,374	0,319	-14,7	5,41	1,99	±25%	±20,3%
Средние содержания	%	0,1657	0,1439	-13,2	3,71	1,99		

Аналогичный анализ выполнен для морфологического типа «крылья». В этом случае выборка бедных руд также не представительна (14 РИ) и

характеризуется существенным завышением суммарных стволовых запасов по ГК на 40 процентов. Однако из-за малого удельного веса таких руд (менее 1 процента запасов) их влияние на общую оценку несущественно. В классе рядовых руд систематических расхождений не выявлено, случайные отклонения параметров РИ между ГК и опробованием находятся в допустимых пределах. Для богатых руд, на долю которых приходится около 55 процентов общих запасов, установлено статистически значимое занижение массовой доли урана и средних стволовых запасов по ГК на 13,2 процента и 14,7 процента соответственно, при случайных расхождениях в допустимых пределах. Систематическое расхождение по мощности РИ составляет -1,8 процента и оценивается как несущественное.

Наиболее вероятной причиной установленных систематических расхождений является применение зависимости коэффициента радиологической редукции (K_{pp}) от содержания радия в рудных интервалах. В условиях низких значений K_{pp} , характерных для интервалов бедных руд, происходит завышение оценок запасов, тогда как более высокие значения K_{pp} в интервалах богатых руд приводят к статистически значимому их занижению. Указанная зависимость K_{pp} , применяемая при интерпретации данных ГК, является источником систематических искажающих эффектов и не соответствует критериям достоверности, установленным Инструкцией по ГК, согласно которым допустимыми считаются только такие расхождения, при которых отсутствуют статистически значимые систематические отклонения и случайные расхождения не превышают предельных значений, определенных методикой [1, 4].

Отдельное внимание следует уделить анализу представительности выборки, использованной в отчете. Общее количество РИ, примененных для оценки достоверности ГК, составляет менее 70 процентов от общего количества кондиционно опробованных интервалов, учтенных при построении зависимости K_{pp} . Это может оказывать значительное влияние на достоверность обобщенных выводов. Для иллюстрации возможных эффектов пополнения выборки был проведен сравнительный анализ двух вариантов одной и той же выборки по 21 скважине: первый вариант включает только те 36 РИ, которые были использованы в отчете [1], второй — дополнен до 64 РИ за счет включения всех кондиционно опробованных интервалов, представленных в базе данных. Несмотря на то, что объем выборки остается недостаточным для стратифицированного анализа по морфологическим типам и классам содержаний, полученные результаты демонстрируют принципиальное изменение статистических характеристик.

Так, при анализе первой (усеченной) выборки установлено отсутствие систематических расхождений между параметрами РИ по ГК и опробованию при допустимых значениях среднеквадратичных отклонений. В то же время при переходе ко второй (дополненной) выборке выявляется статистически значимое занижение массовой доли урана и средних стволовых запасов по ГК на 18,4 процентов и 19,5 процентов соответственно. Указанный эффект свидетельствует о чувствительности итоговых оценок достоверности ГК к полноте и

репрезентативности выборки, а также подтверждает необходимость пересмотра используемых в интерпретации поправок, в частности — зависимости K_{pp} от содержания радия в РИ. Наиболее существенные отклонения при этом выявлены в пределах морфологических типов руд «мешки» и «крылья», на которые приходится основная масса балансовых запасов.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что действующие на момент составления отчета [1] зависимости K_{pp} , применяемые при интерпретации ГК, приводят к систематическому занижению расчетных параметров РИ и, следовательно, не могут быть признаны достоверными по критериям Инструкции по ГК 1987 г. Несмотря на высокую стабильность работы радиометрической аппаратуры и приемлемое качество полевых измерений, интерпретационные методики требуют уточнения и адаптации на основе достоверных и полноценных сравнительных выборок.

5.2 Оценка поправок и зависимостей, применяемых при интерпретации ГК

5.2.1 Анализ применяемых зависимостей K_{pp} от средней массовой доли радия в РИ для мешков и крыльев

Обоснование существования зависимости коэффициента радиологической редуции (K_{pp}) от массовой доли радия в рудных интервалах для морфологических типов «мешки» и «крылья», представленное в отчёте [1], основывается на интерпретации асимметричной формы вариационных графиков. При этом графики, приведённые авторами, характеризуются наличием одного выраженного максимума, а выявленная асимметрия скорее свидетельствует о близком к логнормальному распределении значений K_{pp} , что является характерной особенностью данного параметра. В рамках настоящего исследования был проведён статистический анализ выборок с целью проверки достоверности предполагаемой зависимости K_{pp} от массовой доли радия, а также оценки возможности применения усреднённых значений K_{pp} для каждой выборки, соответствующей конкретному морфологическому элементу (в рассматриваемом случае — для мешков и крыльев, как наиболее значимых с точки зрения участия в формировании запасов).

Анализ показал, что обе выборки — как для мешков, так и для крыльев — являются однородными: коэффициенты вариации находятся в пределах $0,1 < SKO < 0,25$, что исключает необходимость дополнительной проверки на гомогенность и выбраковку данных по критерию Смирнова. Эти результаты подтверждаются формой вариационных графиков, представленных в отчёте [1], и указывают на допустимость статистических обобщений. Проведённые расчёты t -статистики не выявили значимой зависимости K_{pp} ни от массовой доли радия в рудных интервалах, ни от мощности рудных тел: во всех случаях расчётные

значения t оказались ниже критического значения, соответствующего 95 процентному уровню доверия.

Согласно положениям Инструкции по гамма-каротажу 1987 года, в случае подтверждённой однородности выборки допускается использование усреднённых поправок K_{pp} для каждого морфологического типа, что делает возможным применение единой корректировки вместо статистически неустойчивых зависимостей. Полученные в ходе анализа доверительные относительные погрешности средних значений K_{pp} при уровне доверия 95 процентов составляют 4,9 процента для мешков и 3,5 процента для крыльев, что не превышает допустимую величину 5 процентов, регламентированную Инструкцией как предельное значение при оценке средних параметров.

Таким образом, использование единых поправок K_{pp} в значениях 0,58 для морфотипа «мешки» и 0,75 для морфотипа «крылья» для всех классов содержаний урана не противоречит нормативным требованиям и может рассматриваться как обоснованная альтернатива ранее предложенным зависимостям от массовой доли радия. Применение указанных поправок, по предварительным расчетам, позволит увеличить суммарные стволовые запасы: для мешков при массовой доле радия выше 0,07 процентов ожидаемый прирост составляет порядка 17 процентов, а для крыльев — около 12 процентов при аналогичных условиях. Введение данных корректировок также предполагает устранение ранее выявленного систематического занижения массовой доли урана в рудных интервалах класса богатых руд и завышения — в интервалах класса бедных руд. Для руд, относящихся к классу рядовых, значимых изменений не предполагается, так как ранее применяемые поправки близки к установленным средним значениям.

Применение вышеуказанных единых поправок в производственной практике потребует их официального утверждения в Государственной комиссии по запасам (ГКЗ), что представляется обоснованным и целесообразным в контексте повышения точности и достоверности расчётных параметров при геолого-экономической оценке запасов. Примеры пересчёта запасов по технологическим блокам с использованием рекомендованных поправок планируется привести в последующих разделах.

5.2.2 Результаты анализа оценки поправки на «отжатию» радона и зависимостей бортового содержания радия от его среднего содержания в РИ

Оценка поправки на «отжатию» радона, представленная в отчёте, выполнена корректно, в полном соответствии с требованиями действующей Инструкции по гамма-каротажу [6] и не вызывает методических сомнений. Согласно указанной методике, поправка на «отжатию» радона (R_n) для кондиционно-опробованных рудных интервалов (РИ) определялась путём сопоставления массовой доли радия, полученной по результатам геологического опробования (ГО), и гамма-каротажа (ГК) по радиевому каналу при $K_{pp} = 1$ и

значении $R_n = 1$. После этого рассчитывалось среднее значение поправки для представительной выборки.

Объём выборки, использованной для определения поправки на отжиг радона, составил 459 рудных интервалов, что обеспечивает высокую репрезентативность. В отчёте приведено средневзвешенное значение R_n , равное 0,77 отн. ед., при этом стандартное квадратическое отклонение составляет 0,15, а доверительная относительная погрешность определения среднего значения на уровне 95 процентов, доверия — 1,8 процентов. Данный уровень погрешности существенно ниже нормативного значения, установленного Инструкцией по ГК [6], равного 5 процентам, что свидетельствует о высокой достоверности результата.

Единственное замечание по представленной в отчёте методике касается используемой формулы: в соответствии с Инструкцией по ГК 1987 года, поправка на отжиг радона рассчитывается как отношение массовой доли радия в интервале по анализу керна к соответствующему значению по результатам ГК. В то же время в отчёте используется обратное соотношение. Вероятнее всего, это связано с особенностями алгоритмов, реализованных в применяемом программно-интерпретационном комплексе, так как конечные результаты расчётов с применением данной поправки не вызывают сомнений и являются методически обоснованными.

Кроме того, в отчёте представлены зависимости бортового содержания радия от его среднего содержания в рудных интервалах, построенные для двух типов геохимических границ. Эти зависимости получены в соответствии с требованиями Инструкции по ГК, с соблюдением методики, предусмотренной для данного типа расчетов. Несмотря на наличие единичных технических ошибок, они не оказывают сколь-либо значимого влияния на конечные результаты и не нарушают логики обоснования представленных зависимостей.

Качество выделения геохимических границ рудных интервалов, по крайней мере для классов рядовых и богатых руд, являющихся основными с точки зрения формирования запасов, подтверждено сопоставлением данных геофизической и геологической интерпретации. Согласно отчётным материалам, статистически значимые систематические расхождения в мощностях РИ, выделенных по данным ГК и ГО, зафиксированы только для интервалов богатых руд в крыльях, причём величина расхождения составляет всего 1,8 процентов, что не выходит за пределы допустимого диапазона. Случайные среднеквадратические расхождения мощностей РИ между ГК и ГО по классам рядовых и богатых руд также не превышают предельных значений, установленных Инструкцией по ГК [6], что дополнительно подтверждает корректность интерпретации.

5.3 Оценка качества и достоверности КНД-М

В настоящее время, в связи с отсутствием утвержденной и актуализированной инструкции, регламентирующей порядок проведения

каротажа с применением аппаратного комплекса АИНК-60, при выполнении геофизических работ используется документ «Инструкция по каротажу методом мгновенных нейтронов деления при изучении урановых месторождений гидрогенного типа» 1985 года. В соответствии с материалами отчета, на этапе разведки урановых месторождений результаты, полученные методом КНД-М, применялись исключительно в рамках качественной интерпретации, в частности, для определения контуров зон пластового окисления, а также ориентировочной оценки параметров уранового оруденения. Однако в рамках настоящей работы ставилась иная задача — провести всестороннюю оценку возможности использования данных КНД-М для количественного анализа, включая, прежде всего, проверку коэффициента радиоактивного равновесия (K_{pp}), рассчитываемого по результатам геологического опробования керна. Кроме того, отдельное внимание уделяется оценке возможной зависимости значений K_{pp} от содержания радия в рудных интервалах и возможности количественного учета этого соотношения при интерпретации каротажных данных. В связи с этим возрастает значение анализа как методических, так и технических аспектов применения аппаратуры АИНК-60, особенно в части стабильности работы основных функциональных блоков, соответствия фактического режима выполнения каротажа нормативным требованиям, а также соблюдения предусмотренных методикой процедур контроля и градуировки.

Каротаж скважин проводился в режиме непрерывной записи, с одновременной регистрацией плотности потока нейтронов и мощности дозы гамма-излучения. При проведении измерений соблюдался регламентированный скоростной режим — не более 30 м/ч, а оценка технического состояния аппаратуры и стабильности её характеристик выполнялась на основании воспроизводимости измерений, полученных в процессе проведения градуировок и контрольно-поверочных операций, выполнявшихся до и после каждого каротажа. По данным, приведённым в отчете, на всем протяжении эксплуатационного периода (2008–2012 гг.) аппаратный комплекс демонстрировал устойчивость основных метрологических параметров: изменение чувствительности блока нейтронных детекторов ($V'_{кн}$) не превышало 2 процентов при допустимом значении 3 процентов, коэффициенты чувствительности нейтронных каналов (β_1 и β_2) находились в пределах $\pm 7\%$ (при допустимом ± 10 процентов), изменение скорости счета в гамма-канале от контрольного источника ЕР-14 не превышало ± 5 процентов, а отношение сигналов мониторов ($M_{г1}/M_{г2}$) варьировало в пределах от 1,8 до 2,0 при установленной допустимой границе 1,6–2,0. Указанные параметры в совокупности подтверждают стабильную работу аппаратуры в заданный временной период.

Однако проведённый нами анализ первичных материалов КНД-М, выявил существенные расхождения между фактическими условиями выполнения каротажа и регламентированными в методике. В частности, установлено, что заявленная скорость подъёма прибора в 30 м/ч практически нигде не соблюдалась. Фактические значения варьировали в широком диапазоне — от 35

до 97 м/ч, при этом средняя скорость по всей совокупности каротажей составила 50 м/ч. Для примерно 30% скважин этот показатель превышал 50 м/ч, а среднее значение среди них достигало 57 м/ч. Нарушение скоростного режима ведет к ухудшению статистики счёта, в результате чего наблюдается увеличение случайной составляющей погрешности при определении стволовой продуктивности рудных интервалов, которая, по имеющимся данным и накопленному опыту, может достигать 5 процентов в зависимости от степени превышения рекомендованной скорости.

Также зафиксированы отклонения от регламентных требований в части выполнения контрольно-поверочных работ. Согласно отчёту, проверки стабильности характеристик блоков градуировки и детекторов должны проводиться до и после каждого каротажа, однако, как показал анализ, на практике такие процедуры выполнялись не систематически, а с определённой периодичностью. Несмотря на это, результаты контрольных измерений, накопленные за 2012–2016 гг., свидетельствуют о достаточно устойчивой работе аппаратуры, что позволяет заключить, что нерегулярность выполнения поверок не оказала критического влияния на достоверность получаемых данных. Аналогичная ситуация характерна и для блока мониторинга (БМ), градуировка которого также проводилась эпизодически. За весь период геофизических работ в пределах участка было выполнено 33 градуировки БМ, причем в большинстве случаев они предшествовали выполнению каротажа на несколько дней, а иногда и месяцев, что затрудняет однозначную оценку стабильности состояния прибора непосредственно на момент проведения измерений. Наибольшее количество каротажей (около 80 процентов) выполнено с применением прибора СП №6. Согласно данным, в период с 12 февраля по 17 апреля 2013 года коэффициент мониторинга по данному прибору сохранялся на стабильном уровне — среднее значение составило 7738, при СКО 155, что соответствует относительному отклонению менее 2 процентов. С 3 мая 2014 года зафиксировано резкое увеличение значения коэффициента мониторинга до 9350, причины которого установить не удалось. В последующий период (до 24 ноября 2015 года) коэффициент вновь стабилизировался, установившись на среднем уровне 9189 при СКО 423, что соответствует относительному разбросу менее 5 процентов. В 2016 году прибор продолжал функционировать стабильно, демонстрируя среднее значение коэффициента мониторинга 8360 при СКО 268 (менее 3,5 процентов). Работа блоков мониторинга для приборов СП №19 и СП №20, использовавшихся в 2012 году, также не вызывает нареканий: средние значения коэффициента составили 6523 (СКО 248, менее 4 процентов) и 7634 соответственно. Во всех рассмотренных случаях значение коэффициента мониторинга не опускалось ниже порогового уровня в 6000, а изменения между каротажными, проведёнными с минимальным интервалом во времени, не превышали 10 процентов, что позволяет сделать обоснованный вывод о стабильности работы блоков мониторинга и ограничить долю случайной погрешности, связанной с их функционированием, величиной порядка 10%.

Дополнительно следует отметить, что при проведении измерений использовались генераторы нейтронов с выходом не менее 1×10^8 нейтронов в секунду, что соответствует методическим требованиям. Вместе с тем, в отчете [1] полностью отсутствует информация о выполнении обязательных тарировок аппаратурного комплекса на контрольных скважинах или рудных моделях с целью определения градуировочной постоянной A для конкретного скважинного прибора. Между тем, стабильность этого параметра является критически важной для обеспечения достоверности количественной интерпретации каротажных данных. Анализ показал, что в реальности тарировка проводилась с интервалами от одного до шести месяцев, при этом при интерпретации результатов использовалось последнее полученное значение A . Средние значения градуировочной постоянной составили:

- для СП №6 — $A = 0,76$ (СКО $\pm 0,078$)
- для СП №19 — $A = 0,71$ (СКО $\pm 0,046$)
- для СП №20 — $A = 0,92$ (СКО $\pm 0,123$).

Для современных приборов КНД-М, таких как АИНК-49, допустимое отклонение A от паспортного значения не должно превышать 5%. Поскольку для АИНК-60 паспортные значения не регламентируются, стабильность оценивается по отклонению A от собственного среднего значения для каждого прибора. В ряде случаев (например, в мае 2013 года для СП №6) такие отклонения достигали 22%, что, вероятно, связано с заменой детектора, однако в отчете отсутствует информация, подтверждающая или опровергающая это предположение. В целом, высокая изменчивость значения A может быть источником дополнительной случайной погрешности в расчетах параметров рудных интервалов, величина которой оценивается на уровне 10 процентов.

Еще одним фактором, влияющим на достоверность результатов, является методика интерпретации, применявшаяся до 2014 года. В этот период расчет параметров проводился не по каждому пласту отдельно, а для всего интервала каротажа в целом. С внедрением более современной методики, учитывающей вариации времени жизни нейтронов по пластам, были установлены расхождения интерпретационных параметров в пределах одного ствола до 25 процентов и более. Эти отклонения могут быть обусловлены как изменением диаметра скважины, так и вариациями литологического состава и влажности пород. Таким образом, при применении прежней методики суммарная случайная погрешность в расчетах параметров рудных интервалов может достигать 25–30 процентов.

Согласно положениям инструкции по КНД-М 1985 года, оценка уровня случайной погрешности должна осуществляться на основании сравнения метропроцентов рудных интервалов по данным повторных каротажей, выполняемых на контрольных скважинах или рядовых скважинах не реже одного раза в месяц. Общий объем таких контрольных измерений должен составлять не менее 20 рудных интервалов. Среднеквадратическая погрешность не должна превышать 10 процентов, а отклонения результатов на контрольных скважинах от паспортных значений — не более 10 процентов. Однако такие контрольные измерения в рассматриваемый период не проводились ни в ходе разведочных

работ, ни в процессе горно-подготовительных операций. Сведения о выполнении контрольных каротажей в отчете [1] также отсутствуют. В связи с этим невозможно провести полноценную оценку качества и достоверности результатов КНД-М в части обеспечения метрологического контроля и соответствия установленным требованиям.

В условиях проведения геологоразведочных работ в Чу-Сарысуйской впадине метод КНД-М остается одним из немногих количественных методов, обеспечивающих возможность оперативной оценки параметров РИ в пробуренных скважинах. Однако в силу специфики самого метода, зависящего от ряда физико-химических и геологических факторов, остро встает вопрос достоверности получаемых им результатов. В отсутствие других независимых количественных методов, способных подтвердить или опровергнуть данные КНД-М, единственно возможным подходом к контролю качества и оценке достоверности каротажа КНД-М является сопоставление его результатов с данными геологического опробования (ГО), принимаемого в данном случае за контрольный метод.

В рамках рассматриваемых работ была предпринята попытка количественно оценить степень достоверности результатов КНД-М по сравнению с ГО, проведя сопоставительный анализ параметров РИ, полученных разными методами. Основным объектом анализа стали массовая доля урана, метропроцент, а также мощность выделенных РИ. Первоначально имелись материалы, в которых КНД-М рассматривался как эталонный метод по отношению к ГО, что фактически приводило к обратной логике — оценке самого геологического опробования. Однако, учитывая поставленную задачу — подтвердить достоверность именно метода КНД-М — была произведена полная переработка статистических расчетов на основе тех же исходных данных, но уже с принятием геологического опробования в качестве контрольного критерия.

Перерасчет, результаты которого обобщены в таблице 5.3, показал, что случайные относительные расхождения в определении метропроцента по данным КНД-М превышают допустимые значения, установленные нормативными документами для количественных методов. Так, согласно инструкции по применению КНД-М для аппаратного комплекса АИНК-49, предельное допустимое случайное расхождение по метропроценту составляет 25 процентов отн., аналогичный норматив установлен и для гамма-каротажа. Превышение этого предела указывает на необходимость более глубокого анализа причин и источников расхождений.

В целях улучшения репрезентативности выборки и уточнения статистических параметров достоверности была произведена доработка исходной выборки, включающая кондиционно-опробованные РИ по 11 скважинам. При этом в расширенную выборку были добавлены новые интервалы, а также осуществлена корректировка ранее учтенных данных.

Таблица 5.3 - Статистические характеристики сопоставления результатов каротажа КНД-М и ГО по отношению к ГО

Показатели сопоставления для 40 РИ	ГО			КНД		
	m	mC	C	m	mC	C
Сумма	123,70 м	11,4668 м%		122,00 м	11,4170 м%	
Среднее значение	3,093м	0,2867 м%	0,0927 %	3,050 м	0,2854 м%	0,0936 %
Значение t – статистики				0,97	0,63	1,48
Критическое значение $t_{кр}(1)$ (при P=95%)				2,02	2,02	2,02
Случайное расхождение по мощности (Sm), м				0,195		
Относительное случайное расхождение по метропроценту (Smc), %					38,3	
Случайное расхождение по Cu (Sm), %						0,0246
Расхождения средних величин относительно ГО, %				-1,37	-0,43	0,95

Одним из принципиальных моментов, использованных в данной корректировке, стало включение в состав балансовых проницаемых РИ тонких непроницаемых прослоев (мощностью до 0,3 м), содержащих уран в концентрации выше бортовой. Аналогичные пересмотры были произведены и в отношении уже учтенных ранее интервалов, что позволило добиться большей корректности в расчете случайных погрешностей, в частности — по мощности РИ. (см. Таблица 5.4 — «Статистические характеристики сопоставления результатов каротажа КНД-М и ГО для фрагмента выборки из 11 скважин до включения в него дополнительных данных по кондиционно-опробованным РИ»).

Прежняя выборка, включающая в себя множество интервалов, обрезанных сверху или снизу маломощными непроницаемыми прослоями, не позволяла обеспечить адекватную оценку случайной составляющей ошибки, в первую очередь — по мощности РИ. Благодаря корректировке и пополнению базы данных удалось сформировать более стабильную и репрезентативную выборку, на основе которой были пересчитаны статистические характеристики. Полученные результаты свидетельствуют о том, что значения случайных расхождений для массовой доли урана и метропроцента находятся в пределах допустимых значений; систематические расхождения по метропроценту отсутствуют, а по массовой доле урана статистическая ошибка невелика и составляет -2,9 процентов, что свидетельствует об удовлетворительной согласованности результатов КНД-М и ГО.

Однако при анализе добавленных интервалов были выявлены и некоторые проблемы, обусловленные недостатками геологического опробования. В частности, зафиксировано наличие РИ, недоопробованных по кровле или подошве, либо одновременно по обоим борту.

Таблица 5.4 - Статистические характеристики сопоставления результатов каротажа КНД-М и ГО для фрагмента выборки из 11 скважин до включения в него дополнительных данных по кондиционно опробованным РИ

Показатели сопоставления для 18 РИ	ГО			КНД		
	m	mC	C	m	mC	C
Сумма	68,20 м	7,7650м%		66,20 м	7,4741м%	
Среднее значение	3,79 м	0,4314м%	0,1139%	3,68 м	0,4152м%	0,1129%
Значение t – статистики				2,81	0,83	1,24
Критическое значение $t_{кр}(1)$ (при P=95%)				2,11	2,11	2,11
Случайное расхождение по мощности (Sm), м				0,139		
Относительное случайное расхождение по метропроценту (Smc), %					18,1	
Случайное расхождение по Cu (Sm), %						0,0255
Относительные расхождения средних величин, %				-2,9	-0,8	-3,7

Подобные случаи, как правило, связаны с отсутствием керна на соответствующих интервалах вследствие технологических трудностей при бурении. Это приводит к невозможности достоверного определения границ РИ и, как следствие, к искажению параметров, рассчитываемых по ГО. Для частичной компенсации этих погрешностей использовались различные методические подходы. Если мощность пропущенного интервала не превышала 1 м, границы определялись по стандартной методике при больших потерях использовался другой подход — граница фиксировалась по последней пробе с содержанием урана выше бортового. Несмотря на то, что такой метод нельзя признать строго корректным, он позволяет в ряде случаев более достоверно определить объем керна в пределах интервала.

Данный фрагмент выборки с частичным опробованием интервалов не может использоваться для количественной оценки достоверности КНД-М, однако он иллюстрирует последствия, к которым приводит использование ограниченных и неполноценных выборок. Кроме того, в ходе анализа выявлены отдельные случаи возможного систематического расхождения между КНД-М и ГО. Эти отклонения требуют дополнительного изучения. Возможные причины систематического занижения массовой доли урана по данным КНД-М могут быть связаны с недоучетом водородосодержания, в частности — с влагой, связанной с кристаллической структурой глинистых минералов. Даже отклонение на 2 процентов по влажности может вызвать заметное снижение сигнала, регистрируемого КНД-М, и соответственно — занижение рассчитанной массовой доли урана. Вместе с тем нельзя исключать и влияние ограниченной представительности фрагмента выборки, на основе которого проводилось сравнение.

С целью повышения точности и объективности анализа была сформирована полная обобщенная выборка, включающая 46 рудных интервалов

мощностью более 0,5 м. Результаты статистического сопоставления приведены в таблице 5.5. Согласно полученным данным, расхождения между КНД-М и ГО по параметрам РИ носят случайный характер, что подтверждается значениями t-статистики. Случайные погрешности по метропроценту и массовой доле урана укладываются в рамки нормативных значений. Единственным превышающим установленный предел параметром оказалось значение случайного расхождения по мощности РИ (0,288 м против допустимых 0,25 м), что, как показал анализ, обусловлено в первую очередь погрешностями самого геологического опробования — в частности, неточностями в определении границ РИ при отсутствии проб на бортах интервалов.

Таблица 5.5 - Статистические характеристики сопоставления результатов каротажа КНД-М и ГО для полной выборки из 46 РИ 24 разведочных скважин после включения в нее дополнительных данных.

Показатели сопоставления для 46 РИ	ГО			КНД		
	m	mC	C	m	mC	C
Сумма	191,80	22,496 3		189,50	19,5370	
Среднее значение	4,26	0,4999	0,117 3	4,21	0,4342	0,1031
Значение t – статистики				0,84	1,75	0,89
Критическое значение $t_{кр}(1)$ (при P=95%)				2,01	2,01	2,01
Случайное расхождение по мощности (Sm), м				0,288		
Относительное случайное расхождение по метропроценту (Smc), %отн.					23,6	
Случайное расхождение по Cu (Sm), %						0,025
Относительные расхождения средних величин, %				-1,2	-12,1	-13,2

Таким образом, результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие обобщенные выводы. Метод КНД-М обеспечивает приемлемое качество каротажных данных, пригодных для использования в качестве количественного метода определения параметров рудных интервалов. Статистические показатели достоверности, полученные при сопоставлении с ГО, подтверждают достаточную степень точности измерений КНД-М. Метод позволяет достоверно определять массовую долю урана и метропроцент, а также

с некоторыми оговорками — мощность рудных интервалов. Соответственно, КНД-М может быть использован для количественной оценки коэффициента радиевого разрыва (K_{pp}), что особенно важно при проведении оценочных и подсчетных работ на месторождениях урана.

При этом необходимо учитывать методические особенности определения K_{pp} на основе данных КНД-М, включая влияние водородосодержания, морфологии рудных тел и геометрии прослоев, а также учитывать возможные ограничения, связанные с полнотой геологического опробования и условиями бурения.

5.4 Особенности и результаты определения K_{pp} по данным КНД-М в разведочных и технологических скважинах

5.4.1 Особенности применения каротажа КНД-М для оценки K_{pp}

В рамках выполнения интерпретации геофизических данных для оценки K_{pp} рудных интервалов использовались результаты ГК и каротажа КНД-М. Как правило, данные этих методов могут быть использованы для определения суммарной поправки, учитывающей «отжатию» радона и K_{pp} в пределах РИ. Такая поправка рассчитывается как отношение массовой доли радия, определенной по результатам ГК, к массовой доле урана, полученной по результатам КНД-М, в рамках одного и того же рудного интервала. При этом массовая доля радия по ГК определяется без учета поправки на «отжатию» радона.

Поскольку основной задачей настоящего этапа является определение коэффициента рудоносности, точное решение данной задачи требует знания поправки на «отжатию» радона для каждого конкретного интервала. Это позволило бы корректировать данные ГК и использовать значения массовой доли радия, приведенные к условиям равновесия радон-радий, что, в свою очередь, обеспечило бы более точный расчет K_{pp} . Однако при выполнении КНД-М в технологических скважинах, как правило, отсутствует керн, что исключает возможность прямого определения величины поправки на «отжатию» радона для каждого интервала.

В связи с этим в настоящей работе применен упрощенный подход, основанный на использовании среднего значения поправки на «отжатию» радона, ранее полученного и приведенного в отчете [1]. В качестве усреднённого значения для интерпретации данных ГК принято значение поправки 0,77 (отн. ед.). По данным статистического анализа, среднеквадратичное отклонение (СКО) данной величины составляет 0,15, а относительная погрешность определения среднего значения поправки при доверительном интервале 95 процентов не превышает 1,8 процентов. Эта величина существенно ниже нормативного значения, установленного действующей Инструкцией по ГК [6], согласно которой допустимая погрешность не должна превышать 5 процентов. Учитывая

относительно невысокую вариабельность поправки, можно полагать, что полученная оценка K_{pp} для представительных выборок (например, по отдельным морфологическим типам руд – крыльям и мешкам) будет несмещенной и достоверной. Вместе с тем следует учитывать, что вследствие существующей, хотя и небольшой, вариабельности поправки, результирующее значение K_{pp} будет характеризоваться определенной случайной погрешностью.

Методика расчета K_{pp} по данным КНД-М и ГК (на радий), с учетом описанного допущения, включала следующие этапы. В границах каждого рудного интервала, определенного по результатам КНД-М для принятого бортового содержания урана 0,01 процентов, с известным среднеинтервальным содержанием урана, рассчитывалась средняя массовая доля радия. Расчет проводился по результатам дифференциальной интерпретации ГК, выполненной с применением принятой поправки на «отжатие» радона, равной 0,77. Средняя массовая доля радия в интервале определялась с учетом всех измерений ГК в пределах соответствующего РИ. Далее значение коэффициента рудоносности для каждого интервала рассчитывалось как отношение средней массовой доли радия (или метропроцента радия) по ГК к средней массовой доле урана (или метропроценту урана) по результатам КНД-М.

Полученные значения K_{pp} группировались по морфологическим типам рудных тел, с выделением выборок для «мешков» и «крыльев». Учитывая возможные допуски по глубине между измерениями, полученными методами КНД-М и ГК, в анализ включались только рудные интервалы мощностью не менее 0,5 м. Это позволяло минимизировать влияние систематических расхождений по глубине между измерениями разных методов. В случаях, когда по данным наблюдалось явное смещение границ интервала (на 0,3–0,5 м), выполнялась корректировка глубин интервалов по ГК с учетом увязки с результатами КНД-М.

Для анализа K_{pp} в выборку включались РИ, отнесенные к проницаемым рудам. При этом в состав балансовых РИ допускалось включение прослоев непроницаемых руд мощностью не более 0,3 м, а также руд, которые в исходных материалах были отнесены к категории непроницаемых без достаточного геофизического обоснования (например, при наличии высоких значений коэффициента сопротивления (КС) или коэффициента фильтрации (Кф)). В указанных случаях, при наличии оснований, такие интервалы включались в состав проницаемых РИ.

Таким образом, разработанная и примененная методика оценки K_{pp} с использованием совокупности данных КНД-М и ГК с введением средней поправки на «отжатие» радона позволила получить достоверные значения коэффициента рудоносности для обширной и репрезентативной выборки РИ. Несмотря на упрощения, связанные с невозможностью индивидуального учета «отжатия» радона для каждого интервала, результаты оценки считаются обоснованными и пригодными для дальнейшего использования в геолого-экономических расчетах.

5.4.2 Результаты определения К_{рр} по данным каротажа КНД-М в разведочных и технологических скважинах

На первом этапе оценки К_{рр} по данным каротажа КНД-М была сформирована сравнительная выборка, включающая результаты определения К_{рр} по кондиционно опробованному керну (при выходе керна по рудному интервалу не менее 65 процентов) и по данным КНД-М. Основной задачей данного этапа являлось сопоставление оценок К_{рр}, полученных методами геологического опробования и КНД-М. Однако ограниченность исходного материала (в выборку вошли данные по 19 РИ из 11 разведочных скважин) не позволила провести отдельный анализ различий К_{рр} для отдельных морфологических элементов рудных тел (мешков и крыльев). Статистическая обработка данных, показала, что расхождения в средних значениях К_{рр} по ГО и КНД-М не являются значимыми: расчетное значение V-статистики существенно ниже критического при доверительной вероятности 95 процентов. (см. Таблица 5.6 — «Статистические характеристики сопоставления результатов определения К_{рр} по данным каротажа КНД-М и ГО для выборки из 19 РИ 11 разведочных скважин»).

Таблица 5.6 - Статистические характеристики сопоставления результатов определения К_{рр} по данным каротажа КНД-М и ГО для выборки из 19 РИ 11 разведочных скважин.

Статистическая характеристика	Для КНД-М	Для ГО
Среднее значение К _{рр} , отн. ед.	0,75	0,76
СКО для К _{рр} , отн. ед.	0,21	0,26
Погрешность среднего К _{рр} , отн. ед.	0,05	0,06
Относительная погрешность определения среднего К _{рр} (для P=95%), % отн.	12,6	16,2
Случайные относительные среднеквадратические расхождения для К _{рр} , % отн.	12,0	
Расчетное значение V- статистики	0,15	
Критическое значение V-статистики (для P=95%)	2,02	

Среднеквадратические случайные относительные отклонения между значениями К_{рр}, определенными по КНД-М и по ГО, составляют порядка 12%. Относительная погрешность определения среднего К_{рр} для доверительного уровня 95 процентов составила 12,6 процентов по данным КНД-М и 16,2 процентов по данным ГО, что существенно превышает нормативное значение 5 процентов, установленное Инструкцией по гамма-каротажу. Указанное превышение объясняется как ограниченным объемом выборки, так и тем, что она сформирована из РИ, относящихся к различным морфологическим элементам. Тем не менее, результаты сопоставления свидетельствуют об адекватности

методики оценки K_{pp} по КНД-М: средние значения, полученные по данному методу, практически идентичны результатам ГО.

С учетом полученного подтверждения достоверности методики, были проведены расчеты K_{pp} по данным КНД-М для всех разведочных и технологических скважин, и сформированы выборки для оценки средних значений K_{pp} в мешках и крыльях. (см. Таблица 5.7 — «Статистические характеристики выборки для оценки средних значений K_{pp} по данным каротажей КНД-М и ГК в 21 разведочной скважине»).

Таблица 5.7 - Статистические характеристики выборки для оценки средних значений K_{pp} по данным каротажей КНД-М и ГК в 21 разведочной скважине.

Статистическая характеристика	Для мешков	Для крыльев
Объем выборки, РИ	43	24
Среднее значение K_{pp} , отн. ед.	0,65	0,97
СКО для K_{pp} , отн. ед.	0,25	0,34
Погрешность среднего K_{pp} , отн. ед.	0,039	0,069
Относительная погрешность определения среднего K_{pp} (для $P=95\%$), % отн.	11,9	14,2
Расчетное значение критерия Смирнова	2,60	2,86
Критическое значение статистики Смирнова для $P=95\%$	3,10	2,91

По данным КНД-М и ГК для разведочных скважин были выделены две однородные по критерию Смирнова выборки, включающие РИ в проницаемых рудах мощностью более 0,5 м, по 21 скважине для каждого морфологического элемента. Среднее значение K_{pp} составило $0,65 \pm 0,039$ для мешков и $0,97 \pm 0,069$ для крыльев. Относительная погрешность определения средних значений (при доверительной вероятности 95 процентов) составила 11,9 процентов для мешков и 14,2 процентов для крыльев. Превышение нормативного значения погрешности объясняется, в первую очередь, ограниченным объемом выборок, особенно для крыльев, а также возможным влиянием вариабельности поправки на "отжатие" радона, которая не учитывается при интерпретации ГК.

Аналогичный анализ был проведен по данным КНД-М и ГК для технологических скважин (92 скважины). Были выделены две однородные выборки по критерию Смирнова, характеризующие проницаемые РИ мощностью более 0,5 м в мешках и крыльях. Средние значения K_{pp} составили $0,57 \pm 0,019$ для мешков и $0,73 \pm 0,024$ для крыльев. Относительная погрешность составила 6,8 процентов и 6,7 процентов соответственно, что несколько превышает нормативное значение 5 процентов, вероятно, также в связи с

влиянием поправки на радоновое "отжатие", что, впрочем, ожидаемо при использовании предложенной методики. (см. Таблица 5.8 — «Статистические характеристики выборки для оценки средних значений K_{pp} по данным каротажей КНД-М и ГК в 92 технологических скважинах»).

Таблица 5.8 - Статистические характеристики выборки для оценки средних значений K_{pp} по данным каротажей КНД-М и ГК в 92 технологических скважинах.

Статистическая характеристика	Для мешков	Для крыльев
Объем выборки, РИ	180	170
Среднее значение K_{pp} , отн. ед.	0,57	0,73
СКО для K_{pp} , отн. ед.	0,26	0,32
Погрешность среднего K_{pp} , отн. ед.	0,019	0,024
Относительная погрешность определения среднего K_{pp} (для $P=95\%$), % отн.	6,8	6,7
Расчетное значение критерия Смирнова	3,12	3,42
Критическое значение статистики Смирнова для $P=95\%$	3,45	3,45

Для повышения статистической надежности оценок средних значений K_{pp} по результатам КНД-М и ГК в проницаемых рудах, были объединены соответствующие выборки разведочных и технологических скважин. Проверка значимости различий средних значений K_{pp} по V-статистике показала, что расхождения между оценками K_{pp} по ГО и КНД-М как для мешков, так и для крыльев, являются случайными (значения V-статистики ниже критического уровня 1,97 при $P=95$ процентов), что позволяет объединять эти выборки по морфологическому признаку.

Статистические характеристики итоговой объединенной базы данных, включающей значения K_{pp} по КНД-М и ГО для разведочных и технологических скважин. Таблица 5.9 содержит результаты анализа: среднее значение K_{pp} составило $0,58 \pm 0,012$ для мешков и $0,75 \pm 0,011$ для крыльев. При этом относительная погрешность составила 3,99 процентов и 3,74 процентов соответственно, что полностью соответствует нормативным требованиям Инструкции по ГК и подтверждает достоверность и точность оценок.

Таким образом, предложенная методика оценки K_{pp} по совокупным данным ГК и КНД-М позволила значительно повысить как представительность, так и точность оценки средних значений K_{pp} для мешков и крыльев. Уточненные оценки K_{pp} , полученные на основе объединенной базы, могут быть эффективно использованы при подсчете запасов. Как будет показано далее, применение этих уточненных значений позволяет в ряде случаев существенно увеличить запасы технологических блоков при корректной интерпретации морфологических элементов.

Таблица 5.9 - Статистические характеристики полной объединенной выборки для оценки средних значений K_{pp} по данным каротажей КНД-М и ГК и по геологическому опробованию технологических и разведочных скважин.

Статистическая характеристика	Для мешков	Для крыльев
Объем объединенной выборки, РИ	379	530
Среднее значение K_{pp} , отн. ед.	0,579	0,75
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

При этом простое уточнение морфологии РИ с использованием зависимостей K_{pp} из предыдущего отчета не позволяет достичь аналогичного результата. Более того, в технологических блоках, где документально зафиксировано извлечение урана более 100 процентов, даже уточненные средние оценки K_{pp} оказываются недостаточными для объяснения наблюдаемого переизвлечения. По нашему мнению, основными причинами недооценки запасов в таких блоках могут быть два фактора. Во-первых, наличие участков с аномально низкими средними значениями K_{pp} , преимущественно в мешках. Такие зоны были выявлены при анализе пространственного распределения K_{pp} . Во-вторых, возможное вовлечение в процесс выщелачивания рудных интервалов, ранее отнесенных к технологическому забалансу по признаку проницаемости. К таким интервалам относятся: маломощные (0,2–0,4 м) РИ с богатыми рудами и расчетным коэффициентом фильтрации более 0,8 м/сут, а также интервалы с аномально высокими значениями кажущегося сопротивления, исключенные из подсчета запасов без должного геолого-геофизического обоснования. Указанные "условно непроницаемые" РИ могут являться дополнительным источником извлечения урана.

В заключение, приводятся оценки средних значений K_{pp} , рассчитанных на основе полной базы данных (КНД-М и ГО) для разведочных и технологических скважин в пределах блоков с подтвержденным переизвлечением урана (больше 100 процентов). На основании доступных данных, преимущественно по КНД-М, были сформированы выборки: для мешков — 39 РИ из 20 скважин (7 блоков: 21, 28, 32, 33, 41, 44, 45); для крыльев — 16 РИ из 9 скважин (4 блока: 32, 33, 44, 45). Результаты статистической обработки приведены в таблице 5.10.

Обе выборки признаны представительными и однородными по критериям Смирнова и СКО. Среднее значение K_{pp} для мешков в блоках с переизвлечением составило $0,49 \pm 0,033$, что существенно ниже среднего по месторождению ($0,58 \pm 0,012$), и данное расхождение по V-статистике не является случайным.

Таблица 5.10 - Статистические характеристики выборки для оценки средних значений Крр в блоках с переизвлечением.

Статистическая характеристика	Для мешков	Для крыльев
Объем выборки, РИ	39	16
Среднее значение Крр, отн. ед.	0,49	0,76
СКО для Крр, отн. ед.	0,20	0,24
Погрешность среднего Крр, отн. ед.	0,033	0,060
Относительная погрешность определения среднего Крр (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

Для крыльев оценка составила $0,76 \pm 0,060$, что сопоставимо со значением по всей выборке ($0,75 \pm 0,011$); расхождение статистически незначимо. Таким образом, с высокой степенью достоверности можно утверждать, что одной из причин недооценки запасов в блоках с переизвлечением являются заниженные значения Крр в мешковых частях. С учетом того, что основная масса запасов в этих блоках сосредоточена в мешках, недоучет Крр в них может приводить к занижению запасов не менее чем на 10–15 процентов.

5.5 Оценка роли технологического забаланса как возможного дополнительного источника урана

Как уже отмечалось ранее, одним из потенциальных дополнительных источников прироста урана может являться вовлечение в процессы подземного выщелачивания (ПВ) рудных интервалов, ранее отнесенных к технологическому забалансу по критерию проницаемости. Анализ фактических данных позволяет выделить среди таких интервалов, во-первых, маломощные (0,2–0,4 м) рудные тела, характеризующиеся высокими содержанием урана и расчетными коэффициентами фильтрации более 0,8 м/сут, а во-вторых, рудные интервалы с аномально высокими значениями КС, которые были исключены из подсчета запасов без достаточного геолого-геофизического обоснования. Идентификация данных интервалов проводилась на основе анализа литологического расчленения разрезов скважин и сопоставления с расчетными значениями Кф, полученными из данных геофизических каротажей. При этом учитывалось, что значения пластовых сопротивлений и производных от них коэффициентов фильтрации подвержены значительной неопределенности. Хотя в отчете отсутствует прямое указание на величину погрешности определения граничного значения КС,

соответствующего пороговому значению $K_f = 1$ м/сут, оценка точности по результатам сопоставления данных электрокаротажа с результатами опытных гидродинамических откачек в пределах рудовмещающего горизонта указывает на среднеквадратическое расхождение порядка $\pm 20,2$ процентов (по результатам 6 скважин), что свидетельствует о значительной неопределенности оценки проницаемости. Следовательно, нет оснований полагать, что значения, близкие к пороговым, или сами пороговые значения K_f , определяются с большей точностью. Более того, в отчете отсутствует какое-либо аргументированное геолого-геофизическое обоснование для выделения в зону забалансовых техногенных пластов (ЗБТ) интервалов с высокими значениями КС. При этом в подавляющем большинстве случаев расчетные значения K_f для данных пластов, представленные в гиклетах, являются достаточно высокими, что делает их исключение из подсчета, с нашей точки зрения, необоснованным. Для количественной оценки возможного прироста запасов урана за счет вовлечения указанных рудных интервалов в процесс ПВ был выполнен пересчет запасов в пределах трех технологических блоков — 18, 19 и 21. В основу пересчета были положены следующие источники: данные основного подсчета запасов (Каратау, 2016 г.), результаты пересчета, выполненного Дробовым С.Р. в 2018 году с учетом уточненной морфологии залежей и применения зависимостей для K_{pp} , принятых в отчете [1], а также подсчетные формуляры, составленные Дробовым С.Р., позволившие проследить динамику изменения запасов и провести отдельную оценку влияния различных факторов (морфология, роль ЗБТ, K_{pp}) в рамках альтернативных подходов к подсчету. В рамках настоящей работы были выполнены два основных варианта пересчета. В первом варианте в расчет были включены ранее исключенные маломощные рудные интервалы с расчетными K_f выше 0,8 м/сут, а также интервалы с высокими значениями КС, исключенные из баланса без геолого-геофизического обоснования. При этом значения K_{pp} для всех морфологических элементов оставались без изменений и соответствовали варианту пересчета, выполненному Дробовым С.Р. Второй вариант пересчета отличался от первого уточнением средневзвешенных значений K_{pp} для проницаемых руд в морфологических элементах «мешки» и «крылья», в то время как для непроницаемых руд (включая останцы) использовались прежние значения, принятые ранее. Кроме того, для блока 21 был выполнен третий вариант пересчета, основанный на использовании усредненного значения K_{pp} в «мешках», характерного для блоков с достоверно установленным переизвлечением. Все численные расчеты по пересчету запасов в технологических блоках 18, 19 и 21 сводные данные по результатам пересчетов приведены в таблице 5.11. Полученные данные позволяют судить о существенном потенциальном приросте запасов урана при включении в расчет ранее исключенных, но потенциально проницаемых и ураноносных интервалов, и подтверждают необходимость пересмотра критериев выделения забалансовых интервалов с учетом фактических гидрогеологических и геофизических характеристик.

Таблица 5.11 - Таблица эволюции запасов для различных вариантов подсчета

Показатель	Вариант подсчета запасов (Каратау 2016г.)	Вариант подсчета запасов (Дробов С. 2018г.)	Вариант 1 подсчета запасов (Миносьянц А. 2019г.)	Вариант 2 подсчета запасов (Миносьянц А. 2019г.)	Вариант 3 подсчета запасов (Миносьянц А. 2019г.)
Блок 18 (извлечено на сент 2019 г. 595 т)					
Запасы, т	602	614	654	716	
Прирост запасов относительно подсчета 2016 г., т (%)		12 (2,0%)	52 (8,6%)	114 (18,9)	
% извлечения для варианта	98,9%	97,0%	91%	83%	
Блок 19 (извлечено на сент 2019 г. 121 т)					
Запасы, т	125	136	146	162	
Прирост запасов относительно подсчета 2016 г., т (%)		11 (8,8%)	21 (16,8%)	37 (29,6)	
% извлечения для варианта	96,4%	88,6%	82,5%	74,4%	
Блок 21 (извлечено на сент 2019 г. 433 т)					
Запасы, т	414	406	409	440	513
Прирост запасов относительно подсчета 2016 г., т (%)		-8 (-1,9%)	-5 (-1,2%)	26 (5,9%)	99 (23,9%)
% извлечения для варианта	104,5%	106,5%	105,8%	98,3%	84,3%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненного исследования была рассмотрена проблема достоверной интерпретации геофизических данных при разведке урановых месторождений, с акцентом на учет поправок и геологических зависимостей, влияющих на качество и точность получаемых результатов. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью повышения эффективности геологоразведочных работ в условиях возрастающего спроса на уран как стратегическое сырьё для атомной энергетики.

В процессе анализа установлено, что применение геофизических методов, таких как гамма-каротаж, КНД-м и методы электроразведки, требуют обязательного учета влияющих факторов. Среди наиболее значимых были выделены: литологическая неоднородность пород, минерализация, нарушение радиоактивного равновесия и эффект «отжатия» радона из скважины, приводящий к занижению радиометрических показателей.

В рамках работы проанализированы существующие поправочные коэффициенты и эмпирические зависимости, используемые на практике для корректировки каротажных данных. Показано, что учет этих поправок позволяет существенно повысить достоверность подсчёта стволовых запасов урана и сократить расхождения между результатами геофизической интерпретации и лабораторных анализов проб.

Таким образом, сформулированные в работе цели и задачи были достигнуты. Проведённый анализ подтвердил, что системный подход к учету поправок и геологических зависимостей при интерпретации геофизических данных является необходимым условием повышения точности прогноза и надежности моделирования урановых рудных тел. А также, отмечена важность использования данных КНД-м и керна для повышения достоверности данных гамма-каротажа.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

КНД-М - Нейтронный каротаж по мгновенным нейтронам деления
ГК – Гамма-каротаж
ГО – Геологическое опробование
РИ – Рудный интервал
Крр - Коэффициент радиоактивного равновесия
ПВ – Подземное выщелачивание
ЗБТ - Забалансовые техногенные пласты
КС – Каротаж сопротивления
ПС - Каротаж потенциалов самопроизвольной поляризации

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Отчет по глубинному геологическому картированию мезозойско-кайнозойского чехла Чу-Сарысуйской депрессии в масштабе 1:200000 листов L-42-XXII, XXVIII, XXXII(124), XXXIII, XXXIV, K-42-III (5-Б, 6-А,Б,Г), IV (7-8) за 1996–2001 гг. – 2001.
- 2 Turebekova G. Z., et al. Assessment of environmental damage in production and processing of uranium ores on the enterprises "Karatau" // Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2016. – № 3. – С. 143–148.
- 3 Языков В. Г., и др. Геотехнология урана на месторождениях Казахстана. – Алматы: НАК «Казатомпром», 2001.
- 4 Отчет по результатам детальной разведки с подсчетом запасов урана по категориям С1 и С2 на участке 2 месторождения Буденновское по состоянию на 01.01.2015. – Алматы, 2015.
- 5 Инструкция по гамма-каротажу при поисках и разведке урановых месторождений. – М.: Министерство геологии СССР, 1987.
- 6 Инструкция по гамма-каротажу на месторождениях урана (МИ-№ 115/210-(01.00250-2008)-2011). – СПб: ФГУНПП «Геологоразведка», 2012.
- 7 Инструкция по каротажу методом мгновенных нейтронов деления при изучении урановых месторождений гидрогенного типа. – Ленинград: НПО «Рудгеофизика», 1985.
- 8 Шумилин М. В., и др. Разведка месторождений урана для отработки методом подземного выщелачивания. – М.: Недра, 1985.
- 9 Отчет по результатам детальной разведки участка 3 месторождения Буденновское с подсчетом запасов урана и ППК. – Алматы, 2014. – 189 с.
- 10 Демехов Ю. В. Каротаж нейтронов деления (КНД-М) при разведке и эксплуатации месторождений урана гидрогенного типа: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2013. – 221 с.
- 11 Инструкция МВИ по определению содержания урана методом каротажа по мгновенным нейтронам деления (КНД-М) на месторождениях урана пластово-инфильтрационного типа.
- 12 Инструкция по применению Классификации запасов к гидрогенным месторождениям урана. – Астана: Министерство энергетики и минеральных ресурсов РК, 2008. – № 319.
- 13 ГОСТ Р 54362-2011. Геофизические исследования скважин. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011.
- 14 Инструкция МВИ по гамма-каротажу на месторождениях урана пластово-инфильтрационного типа / Рег. № KZ.07.00.03328-2016. – 2016.
- 15 Аппаратурно-методические комплексы каротажа мгновенных нейтронов деления (АМК КНД-М), в аппаратурной реализации АИНК-48, АИНК-60. Методика поверки / Рег. № KZ.04.02.12477-2019. – 2019.
- 16 Поляченко А. Л., Поляченко Л. Б., Румянцев Д. Р. Программно-интерпретационное и методическое обеспечение каротажа на уран по

мгновенным нейтронам деления (КНД-М) // Докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Ядерно-геофизические полевые, скважинные и аналитические методы...». – М.: РОО ЯГО, 2009. – С. 190–205.

17 Инструкция по каротажу методом мгновенных нейтронов деления при изучении урановых месторождений гидрогенного типа / Под ред. А. И. Миронова; сост.: Ганичев Г. И., Макаров Н. А., Хайкович И. М. и др. – Ленинград: НПО «Рудгеофизика», 1986.

18 Темирханова, Р. Г. Совершенствование методики определения содержания урана в рудовмещающих породах по данным методов ГИС [Электронный ресурс] : дис. ... д-ра философии (PhD) : 6D070600 – Геология и разведка месторождений полезных ископаемых / Р. Г. Темирханова ; науч. консультанты: А. Нурмагамбетов, А. В. Шурилов ; Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева. – Алматы, 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) : формат PDF. – Загл. с экрана. – Библиогр.: с. 106–111.

19 Методические рекомендации по геофизическому опробованию при подсчете запасов месторождений металлов и нерудного сырья. – М.: ФГУ ГКЗ, 2007. – Утв. распоряжением МПР России № 37-р от 05.06.2007.

20 Д. Каражанова, М. Керимжанова, Г. Баймаханова, А. Альпеисов. Стандарт организации. Система менеджмента качества НАО КазННТУ им. К. И. Сатпаева. Общие требования к построению, изложению, оформлению содержания текстового и графического материала. СТ КазННТУ – 09 – 2013. 49 с.