

Федеральное медико-биологическое агентство
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ И ГИГИЕНЫ
ФЕДЕРАЛЬНОГО МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОГО АГЕНТСТВА
(ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА РОССИИ)



УТВЕРЖДАЮ
И.о. директора
ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России
д-р хим. наук, доцент

С.В. Новиков

«18» сентября 2023 г.

ЭЛЕКТРОННЫЙ СПРАВОЧНИК
ПО РАДИАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТЕРРИТОРИЙ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕСТ ДОБЫЧИ УРАНОВЫХ РУД

по теме «Модификация, развитие и пополнение информационно-аналитической системы по природным источникам ионизирующих излучений с учетом проблем санитарно-гигиенического мониторинга и оценки состояния радиационной безопасности в местах существующей и прошлой добычи и переработки урановых руд»

(подэтап 3.8)


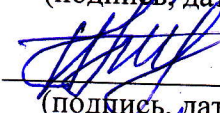
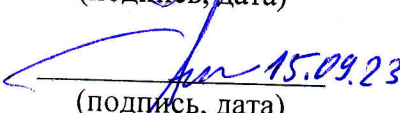
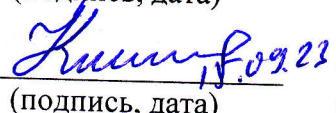
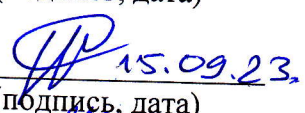
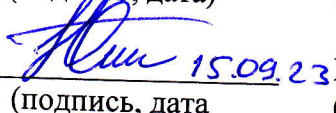
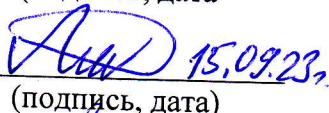
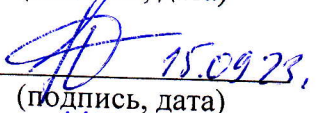
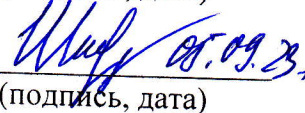
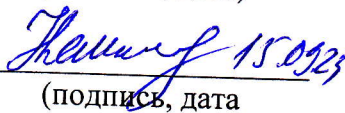
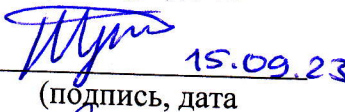
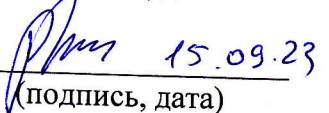
Государственный контракт № 21.003.21.2 от 21.06.2021 г., с учетом дополнительных соглашений № 1 от 21.02.2022, № 2 от 21.02.2022, № 3 от 17.05.2022, № 4 от 15.03.2023
шифр «Система-21»

Ответственный исполнитель
НИР, к.т.н.

С.Ю. Антропов
(подпись, дата) 15.09.23

Москва 2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., доцент	 (подпись, дата)	А.М. Маренный (Все разделы)
Старший научный сотрудник, д.г.-м.н., профессор РАН	 (подпись, дата)	15.09.23, П.С. Микляев (Все разделы)
Зав.лабораторией, к.ф.-м.н.	 (подпись, дата)	15.09.23 Г.П. Герцен (Все разделы)
Старший научный сотрудник, к.б.н.	 (подпись, дата)	15.09.23 С.М. Киселев (Разделы 2,3,4, Приложение А)
Научный сотрудник	 (подпись, дата)	15.09.23 Л.Э. Карл (разделы 1,5,6)
Младший научный сотрудник	 (подпись, дата)	15.09.23 Ю.К. Губанова (разделы 2,3,6, приложение А)
Ведущий инженер	 (подпись, дата)	15.09.23 С.Г. Лукьянов (разделы 5,6)
Инженер 1 категории	 (подпись, дата)	15.09.23, Р.А. Щеглов (поддержка оргтехники)
Инженер 1 категории	 (подпись, дата)	15.09.23, В.В. Шлыгин (разделы 2,3 Приложение А)
Инженер 2 категории	 (подпись, дата)	15.09.23, Е.И. Кайгородов (разделы 2,3,6 приложение А)
Старший техник	 (подпись, дата)	15.09.23 М.Р. Мнацаканян (разделы 2,3,6)
Нормоконтроль	 (подпись, дата)	15.09.23 Р.Н. Кишиневский (Все разделы)

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛОССАРИЙ.....	9
Список сокращений	17
1. Уран. Общие характеристики	18
1.1. Радиационно-физические свойства урана.....	18
1.2. Химические свойства урана.....	26
1.3. Распространение урана в природе.....	27
1.4. Добыча урана в мире	28
1.5. Добыча урана в россии.....	31
2. Территории добычи урановых руд в российской федерации.....	36
2.1. Эльконский рудный район.....	36
2.1.1. Общая характеристика района	36
2.1.2. Геологическое строение	38
2.1.3. Радиозэкологическая обстановка.....	40
2.2. Стрельцовский рудный район	42
2.2.1. Общая характеристика района	42
2.2.2. Геологическое строение	44
2.2.3. Радиозэкологическая обстановка.....	47
2.3. Витимский рудный район	49
2.3.1. Общая характеристика района	49
2.3.2. Общая характеристика АО «Хиагда»	51
2.3.3. Геологическое строение	52
2.3.4. Радиозэкологическая обстановка.....	55
2.4. Зауральский рудный район	60
2.4.1. Общая характеристика района	60
2.4.2. Геологическое строение	61
2.4.3. Радиозэкологическая обстановка.....	64
2.5. Месторождение онежского района	68
2.5.1. Общая характеристика района	68

2.5.2. Геологическое строение	70
2.5.3. Радиозэкологическая обстановка.....	73
3. Особенности формирования территориальных рисков для населения и окружающей среды в районах добычи урановых руд.....	77
3.1. Особенности технологических процессов добычи и переработки урановых руд и их влияние на формирование территориальных рисков для населения и окружающей среды	77
3.1.1. Добыча урана с извлечением и переработкой рудной массы	78
3.1.2. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания	84
3.1.3. Источники загрязнения окружающей среды, формирующие территориальные риски для населения, проживающего в районах расположения предприятий по добыче урановой руды.....	87
3.2. Основные пути радиационного воздействия на человека и окружающую среду.....	88
3.3. Контролируемые параметры загрязнения окружающей среды	90
4. Нормативно-методическое обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах расположения предприятий по добыче и переработке урановых руд.....	92
4.1. Требования по защите населения от радона в коммунальных условиях	93
4.2. Требования по ограничению облучения населения от радона в производственных условиях	94
4.3. Требования ограничения облучения населения от пиии при потреблении питьевой воды.....	95
4.4. Требования ограничения облучения населения от пиии, содержащихся в минеральном сырье, стройматериалах, и промышленных отходах	98
5. Методы и средства радиационных измерений.....	103
5.1. Целеобусловленность радиационных измерений.....	103

5.2. Классификация и характеристики средств измерения ионизирующих излучений	104
5.3. Основные методы регистрации ионизирующих излучений.....	108
5.3.1. Ионизационный метод	108
5.3.2. Сцинтилляционный метод	112
5.3.3. Люминесцентный метод.....	116
5.3.4. Трековый метод.....	117
6. Организация хранения и анализа данных по радиационной обстановке на территориях перспективной добычи урановых руд (на базе разработанной иас пиии)	123
6.1. Основные информационные ресурсы об облучении населения рф	123
6.2. Организация системы хранения данных по радиационной обстановке на примере иас пиии	126
6.3. Организация программных средств хранения и анализа данных на примере иас пиии	128
6.4. Структуры справочной информации об измерении.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	166

ВВЕДЕНИЕ

В связи с планируемым увеличением количества работающих энергетических блоков на существующих и проектируемых атомных электростанциях, в ближайшие годы будут введены новые предприятия по добыче и переработке урановых руд в различных районах России. Освоение новых месторождений урана связано с возможным увеличением негативного воздействия на окружающую среду, включая загрязнение территорий радионуклидами (РН) уранового ряда, а также необходимостью строительства новой жилой и производственной инфраструктуры на территориях, характеризующихся повышенными концентрациями радионуклидов природного происхождения. Все это может приводить к увеличению доз облучения населения и требует тщательного изучения и контроля. Неотъемлемым элементом этого процесса является определение исходных (фоновых) радиоэкологических условий территории, включающей исходные фоновые значения радиационных, химических, биологических параметров объектов окружающей среды на используемой территории. Исходные радиоэкологические условия территории необходимы в качестве базового начального уровня, сравнение с которым результатов последующего радиоэкологического мониторинга окружающей среды в ходе эксплуатации месторождений позволит оценить реальное воздействие действующих предприятий по добыче урановых руд на окружающую среду. Это особенно важно для территорий, где добыча урановых руд или разведочные геологические работы с экспериментальным опробованием осуществлялась уже длительное время, что привело к поступлению техногенно-сконцентрированных ЕРН и изменению природного радиационного фона в прошлом.

Хранение, обработку и анализ результатов исследований начальных радиоэкологических условий и последующего мониторинга радиационных и химических параметров окружающей среды, а также сопутствующей климатической, метеорологической, геолого-геофизической и иной

информации целесообразно проводить с использованием усовершенствованной в ходе настоящих исследований информационно-аналитической системы по природным источникам ионизирующего излучения ИАС ПИИИ, созданной на базе ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России.

В справочнике в систематизированном виде представлена имеющаяся к настоящему времени информация из открытых источников, характеризующая радиационные параметры территорий перспективных мест добычи урановых руд, доступная для скачивания на сайте ИАС ПИИИ. В первой главе справочника дана общая характеристика урана как химического элемента, сырья для атомных реакторов и источника облучения человека. Во второй главе приводится более подробная характеристика основных мест существующей и перспективной добычи урана в России, включая общую характеристику каждого района, геологическое строение и радиозэкологическую обстановку на текущий момент. В третьей главе описаны общие особенности формирования территориальных рисков для населения и окружающей среды в районах добычи урановых руд. Глава включает описание особенностей технологии добычи урана различными способами, характеристику источников радиационного воздействия и основных путей поступления радионуклидов в окружающую среду и организм человека, описание параметров окружающей среды, которые необходимо контролировать в ходе оценки исходных радиозэкологических условий и последующего радиозэкологического мониторинга. В четвертой главе дана характеристика нормативно-методического обеспечения радиационной безопасности населения, проживающего в районах расположения предприятий по добыче и переработке урановых руд. В пятой главе перечислены методы и средства измерений, применяемые при радиозэкологических исследованиях в районах добычи урановых руд. В шестой главе описана организация хранения и анализа данных по радиационной обстановке на территориях перспективной добычи урановых руд (на базе разработанной ИАС ПИИИ). В Приложении дана сравнительная

характеристика динамики выбросов и сбросов при добыче урана различными способами на трех действующих в настоящее время предприятиях по добыче урана – ППГХО им. Е.П. Славского, АО «Далур» и АО «Хиагда».

Справочник рассчитан на широкий круг специалистов по всем аспектам радиационной безопасности населения, работников ЦГиЭ ФМБА России и Роспотребнадзора, специалистов лабораторий радиационного контроля и радиационных подразделений различной принадлежности, проектных организаций, занимающихся разработкой проектов радиационно-экологической экспертизы проектной документации, студентов и аспирантов различных специальностей.

ГЛОССАРИЙ

- Активность (A) – мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент времени:
 $A = dN / dt$, где dN – ожидаемое число спонтанных ядерных превращений из данного энергетического состояния, происходящих за промежуток времени dt . Единицей активности является беккерель (Бк). Используемая ранее внесистемная единица активности кюри (Ки) составляет $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк [НРБ-99/2009].
- Активность удельная (объемная) – отношение активности A радионуклида в веществе к массе m (объему V) вещества:
 $A_m = A / m$; $A_V = A / V$.
Единица удельной активности (УА) – беккерель на килограмм, Бк/кг. Единица объемной активности (ОА) – беккерель на метр кубический, Бк/м³.
- Беккерель (Бк) – единица активности в Международной системе единиц СИ, соответствующая одному распаду в секунду.
- Вулканическая кальдера – крупная циркоподобная, округлая или овальная впадина с крутыми стенками и более или менее ровным дном, возникшая в результате провала вершины вулкана, а иногда и части прилегающей к нему местности. Часто вулканизм носит унаследованный характер и более поздние кальдеры накладываются на более ранние, создавая сложную вулканогенную структуру. Кальдеры достигают 10–20 км в поперечнике и нескольких сотен метров в глубину.
- Вулканогенно-осадочные породы – горные породы, состоящие из смеси вулканогенного и осадочного материала. Вулканогенная составляющая может быть представлена пирокластическими обломками или хемогенными образованиями, осадочная – терригенным материалом. К этим породам относятся туфы.
- Гидротермально- – процессы преобразования горных пород с

метасоматические процессы	существенным изменением минерального и химического состава, происходящим в результате взаимодействия пород с горячими и перегретыми водными растворами, происходящие при циркуляции растворов в недрах земли.
Гранитно-метаморфическое основание (фундамент)	– комплекс наиболее древних и глубоко залегающих в данном регионе пород, сложенных в складки и пронизанных гранитными интрузиями. Возраст фундамента может быть очень разным от архейского до кайнозойского в зависимости от региона.
Грунт	– любая горная порода, почва, осадок и техногенные минеральные образования, рассматриваемые как многокомпонентные динамичные системы и часть геологической среды, изучаемые в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью.
Естественные радионуклиды (ЕРН)	– радионуклиды, которые встречаются в естественных условиях на Земле в значимых количествах. Этот термин обычно используется для обозначения первичных радионуклидов ^{40}K , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th и продуктов их радиоактивного распада. Данный термин имеет значение, противоположное значению термина ‘радионуклиды искусственного происхождения’, а также терминов ‘искусственные радионуклиды’, ‘радионуклиды антропогенного происхождения’, ‘антропогенные радионуклиды’ и ‘техногенные радионуклиды’ [Глоссарий МАГАТЭ, 2007].
Изотопы	– нуклиды одного и того же порядкового номера, отличающиеся по массе.
Изотопы радона	– радон (^{222}Rn), торон (^{220}Rn), актинон (^{219}Rn) – газообразные радионуклиды рядов ^{238}U , ^{232}Th и ^{235}U , соответственно; продукты распада ^{226}Ra , ^{224}Ra и ^{223}Ra , соответственно.
Интегральные измерения ОА радона	– долгосрочные измерения объемной активности радона в воздухе помещений, продолжительность которых составляет не менее 10 суток.
Инфильтрация	– проникновение атмосферных осадков, поверхностных вод, вод искусственных водоемов через ненасыщенные водой почвы и грунты (зону

	аэрации) в вертикальном направлении к грунтовому водоносному горизонту.
Ионизирующее излучение	– потоки фотонов, элементарных частиц или атомных ядер, способные ионизировать атомы вещества.
Кларк	– среднее содержание химического элемента в земной коре.
Короткоживущие дочерние продукты радона (ДПР) и торона (ДПТ)	– изотопы ^{218}Po (RaA), ^{214}Pb (RaB), ^{214}Bi (RaC) и ^{212}Pb (ThB), ^{212}Bi (ThC), соответственно. В ряде случаев, при явном указании изотопа радона, под аббревиатурой «ДПР» понимаются «дочерние продукты распада».
Космическое излучение	– ионизирующее излучение, которое состоит из первичного излучения, поступающего из космического пространства, и вторичного излучения, образующегося при взаимодействии первичного излучения с атмосферой Земли; является компонентом естественного (природного) радиационного фона.
Кюри (Ки)	– внесистемная устаревшая единица активности, равная $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.
Линейная передача энергии	– количество энергии, переданной веществу заряженной частицей на единице длины ее пробега, кэВ/мкм.
Литификация	– процесс уплотнения осадка под давлением вышележащих пород. В результате литификации осадки (пластичные породы) теряют воду и превращаются в плотные (литифицированные) горные породы.
Магматические горные породы (комплексы)	– горные породы (комплексы горных пород) образовавшиеся при застывании и кристаллизации горячего силикатного расплава земной коры (магмы). Примеры: граниты, диориты, габбро (т.н. интрузивные породы, образовавшиеся при медленном остывании магмы на большой глубине под давлением); риолиты, дациты, базальты (т.н. эффузивные или вулканические породы, образующиеся при быстром застывании магмы при ее излиянии на поверхность земли).

- Метаморфические горны породы – широкий класс горных пород, образовавшихся в результате изменения осадочных, магматических или более древних метаморфических пород под действием температуры и/или давления. Степень и глубина изменений зависит от Р-Т условий и времени воздействия. Например, сланцы представляют собой метаморфизованные глины, мрамор – метаморфизованный известняк, а гнейс – метаморфизованный гранит.
- Облучение – процесс воздействия ионизирующего излучения на среду или организм человека.
- Облучение внешнее – облучение людей за счет гамма-излучения природных радионуклидов, присутствующих в среде обитания и окружающей среде.
- Облучение внутреннее – облучение людей за счет ингаляционного поступления в организм аэрозолей долгоживущих природных радионуклидов и изотопов радона и их короткоживущих дочерних продуктов распада, а также перорального поступления радионуклидов с пищевыми продуктами и питьевой водой.
- Объемная активность (ОА) радона (торона) – активность радона (торона) в одном кубическом метре воздуха, Бк/м³ [МР 2.6.1.0172-20; МР 2.6.1.0280-22].
- Огаркохранилище – место складирования остатков руды после обработки их концентрированным раствором серной кислоты.
- Осадочные горные породы – горные породы, возникшие путём осаждения вещества в водной, реже воздушной средах в морских или континентальных бассейнах седиментации. По составу различают терригенные породы, состоящие из осевших минеральных частиц – пески, глины, песчаники, аргиллиты и т.п. и карбонатные породы, состоящие из осевших раковин различных моллюсков карбонатного состава (реже в результате химического осаждения карбонатов) – известняки, доломиты и т.п.
- Палеодолины (палеорула, палеоврезы) – долины древних рек, существовавших в прошлые геологические эпохи, когда уровень моря и, соответственно, базис эрозии был ниже современного. Палеодолины сохранились часто

- фрагментарно, в настоящее время заполнены песчано-глинистыми отложениями древних рек, перекрыты более молодыми отложениями и не проявлены в современном рельефе. Тальвеги палеодолин врезаны глубже современного базиса эрозии.
- Паспорт измерения (организации, территории) – формализованная схема записи необходимых сведений об объекте измерения; при проведении измерений содержания радона в воздухе для каждого обследуемого помещения должны регистрироваться строительно-конструкционные и другие характеристики, которые оказывают влияние на накопление радона.
- Плотноионизирующее излучение – ионизирующее излучение, характеризующееся линейной передачей энергии в тканеэквивалентной среде более 10 кэВ/мкм.
- Плотность потока радона – активность радона, проходящего через единицу поверхности грунта или строительных конструкций в единицу времени, мБк/(м²·с).
- Потенциально радоноопасный участок – участок территории, на котором строительство незащищенного от поступлений радона здания может привести к формированию сверхнормативной среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений.
- Почва – природное тело, формирующееся в результате преобразования поверхностных слоев литосферы под совместным воздействием воды, воздуха и живых организмов [БРЭ].
- Природные источники ионизирующего излучения – источники ионизирующего излучения природного происхождения, на который распространяется действие НРБ-99/2010. Проявление природных источников излучения связано с присутствием природных радионуклидов в объектах среды обитания и окружающей среды. К ним относятся источники космического излучения, а также излучение, связанное с природными радионуклидами, содержащимися в среде обитания людей, окружающей среде, питьевой воде, продуктах питания и теле человека. Природные источники

излучения делятся на регулируемые и нерегулируемые [СанПиН 2.6.1.2800-10].

- Пробег частицы – Длина отрезка от источника частицы или точки ее входа в вещество до точки остановки.
- Радиационная безопасность населения – состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения [НРБ-99/2009], а также комплекс мероприятий, направленных: а) на ограничение облучения населения и персонала до наиболее низких значений дозы облучения, достигаемых средствами, приемлемыми для общества; б) на предупреждение возникновения ранних последствий облучения; в) на ограничение до приемлемого уровня проявлений отдаленных последствий облучения.
- Радиоактивность – самопроизвольное превращение атомных ядер, сопровождающееся испусканием ионизирующего излучения.
- Радонозащитные (противорадоновые) мероприятия – комплекс мер, необходимых для уменьшения дозы облучения населения изотопами радона и их дочерними продуктами распада.
- Радоноопасность – заключенная в объекте возможность нанесения вреда здоровью человека вследствие воздействия изотопов радона и их дочерних продуктов распада.
- Риск – вероятность наступления негативных последствий.
- Сингония – классификация кристаллографических групп симметрии, кристаллов и кристаллических решёток в зависимости от системы координат (*координатного репера*); группы симметрии с единой координатной системой объединяются в одну сингонию.
- Эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) радона (торона) – взвешенная сумма объемных активностей короткоживущих дочерних продуктов распада радона (торона) в неравновесной смеси, равная объемной активности радона (торона) в состоянии равновесия с его дочерними

продуктами распада, при которой суммарная энергия альфа-излучения, выделяемая при распаде всех дочерних продуктов (скрытая энергия), имеет такую же величину, как и для данной неравновесной смеси:

$$C_{Rn} = 0,104 \cdot A_{RaA} + 0,514 \cdot A_{RaB} + 0,382 \cdot A_{RaC},$$

$$C_{Tn} = 0,913 \cdot A_{ThB} + 0,087 \cdot A_{ThC},$$

где A_{RaA} , A_{RaB} , A_{RaC} – объемные активности короткоживущих дочерних продуктов радона в воздухе;

A_{ThB} , A_{ThC} – объемные активности короткоживущих дочерних продуктов торона в воздухе.

Единица измерения – Бк/м³ [МР 2.6.1.0172-20; МР 2.6.1.0280-22].

Экспозиция – временной интеграл объемной активности дочерних продуктов распада радона во вдыхаемом воздухе. Определяется как произведение ЭРОА радона на длительность воздействия радона на человека. Единица измерения – Бк·ч/м³.

Эманирование – процесс выделения радона твердыми телами, содержащими материнский радионуклид ²²⁶Ra. Интенсивность процесса зависит от температуры, влажности и структуры тела и меняется в очень широких пределах.

Эффективная удельная активность естественных радионуклидов $A_{эфф}$ – интегральная характеристика внешнего гамма-излучения материальных сред, которая учитывает удельный вклад содержащихся в ней природных радионуклидов в мощность дозы гамма-излучения и определяется соотношением:

$$A_{эфф} = \sum_{^{238}U + ^{235}U} k_i \cdot A_i + \sum_{^{232}Th} k_i \cdot A_i + k_{^{40}K} \cdot A_{^{40}K}$$

в котором суммирование ведется по всем гамма-излучающим радионуклидам природных рядов ²³⁸U и ²³⁵U (первое слагаемое), ²³²Th (второе слагаемое) и ⁴⁰K (третье слагаемое), а коэффициенты k_i учитывают относительный вклад гамма-излучения каждого из природных радионуклидов во внешнее гамма-излучение материала с данным содержанием природных

радионуклидов. В условиях радиоактивного равновесия в рядах ^{238}U и ^{232}Th и значение $A_{\text{ЭФФ}}$ рассчитывается по формуле:

$$A_{\text{ЭФФ}} = A_{\text{Ra}} + 1,3 \cdot A_{\text{Th}} + 0,09 \cdot A_{\text{K}}, \text{ Бк/кг},$$

где A_{Ra} и A_{Th} (Бк/кг) – удельные активности ^{226}Ra и ^{232}Th , находящихся в радиоактивном равновесии с остальными членами уранового и ториевого рядов соответственно, а A_{K} (Бк/кг) – удельная активность ^{40}K [СанПиН 2.6.1.2800-10].

Хвостохранилище

– место складирования жидких отходов горно-обогатительного производства («хвостов»).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

В настоящем отчёте о НИР применяются следующие сокращения и обозначения:

$A_{эфф}$	– эффективная удельная активность естественных радионуклидов
ДПР	– дочерние продукты распада
ДТД	– диэлектрические трековые детекторы
ЕРН	– естественные радионуклиды
МЭД	– мощность экспозиционной дозы
ОА	– объёмная активность
ПАО «ППГХО»	– Приаргунское производственное горно-химическое объединение (г. Краснокаменск, Забайкальский край)
ПВ	– подземное выщелачивание
ПИИИ	– природные источники ионизирующего излучения
ППД	– полупроводниковые детекторы
ПС	– пропорциональные счетчики
РАО	– радиоактивные отходы
РН	– радионуклиды
РОО	– радиационно-опасный объект
СГМ	– счётчик Гейгера-Мюллера
СЗЗ	– санитарно-защитная зона
СИ	– средства измерений
УВ	– уровень вмешательства
ФЭУ	– фотоэлектронный умножитель
ЭРОА	– эквивалентная равновесная объёмная активность

1. УРАН. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1. Радиационно-физические свойства урана

Уран (Uranium) - химический элемент с атомным номером 92 в периодической системе Менделеева, обозначается символом U, атомная масса - 238,029, относится к семейству актиноидов [1].

Уран — очень тяжёлый, слабо радиоактивный глянцевитый металл серебристо-белого цвета (рисунок 1). В чистом виде он немного мягче стали, ковкий, гибкий, обладает небольшими парамагнитными свойствами, имеет температуру плавления 1132,3 °С [2,3].



Рисунок 1 – Урановая руда и изделие из урана

Уран имеет три кристаллические модификации:

- α -U, (стабильна до 667,7 °С), ромбическая сингония, пространственная группа C_{2h}^2 , параметры ячейки $a = 0,2858$ нм, $b = 0,5877$ нм, $c = 0,4955$ нм, $Z = 4$;
- β -U, (стабильна от 667,7 °С до 774,8 °С), тетрагональная сингония, пространственная группа P_4/mnm , параметры ячейки $a = 1,0759$ нм, $c = 0,5656$ нм, $Z = 30$;
- γ -U, (существующей от 774,8 °С до точки плавления при 1132,2 °С), кубическая сингония, пространственная группа $I m\bar{3}m$, параметры ячейки $a = 0,3524$ нм, $Z = 2$.

Природный уран состоит из смеси трех изотопов: ^{238}U - 99,2739% с периодом полураспада $T_{1/2} = 4,51 \cdot 10^9$ лет, ^{235}U - 0,7024% ($T_{1/2} = 7,13 \cdot 10^8$ лет)

и ^{234}U - 0,0057% ($T_{1/2} = 2,48 \cdot 10^5$ лет). Из 11 искусственных радиоактивных изотопов с массовыми числами от 227 до 240 долгоживущий - ^{233}U ($T_{1/2} = 1,62 \cdot 10^5$ лет); он получается при нейтронном облучении тория. Подробнее свойства изотопов урана представлены в Таблице 1 [4].

Таблица 1 – Радиоактивные свойства некоторых изотопов урана (жирным шрифтом выделены природные изотопы)

Массовое число	Период полураспада	Основной тип распада
233	$1,59 \cdot 10^5$ лет	A
234	$2,45 \cdot 10^5$ лет	A
235	$7,13 \cdot 10^8$ лет	A
236	$2,39 \cdot 10^7$ лет	A
237	6,75 сут.	β^-
238	$4,47 \cdot 10^9$ лет	A
239	23,54 минуты	β^-
240	14 часов	β^-

Продукты распада естественных радионуклидов (РН) ^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U сами являются радиоактивными. Распадаясь, они образуют другие радионуклиды до тех пор, пока не образуются стабильные нуклиды. Последовательность образующихся друг из друга за счет альфа- и бета-распадов РН образует семейство или ряд радиоактивного распада. Конечным продуктом распада у семейств урана и тория являются стабильные изотопы свинца.

Радиоактивные ряды распада урана-238, урана-235 и тория-232 представлены в таблицах 2–4 и на рисунках 2-4.

Таблица 2 – Радионуклиды семейства с атомной массой $A=4 \cdot n$ (ряд тория)

Нуклид	Историческое название	Вид распада	Период полураспада	Выделяемая энергия, МэВ	Продукт распада
^{232}Th	Торий	α	$1,405 \cdot 10^{10}$ лет	4,081	^{228}Ra
^{228}Ra	Мезоторий 1	β	5,75 лет	0,046	^{228}Ac
^{228}Ac	Мезоторий 2	β	6,15 ч	2,124	^{228}Th
^{228}Th	Радиоторий	α	1,9116 года	5,520	^{224}Ra
^{224}Ra	Торий X	α	3,66 дня	5,789	^{220}Rn
^{220}Rn	Торон (эманация тория)	α	55,6 с	6,404	^{216}Po
^{216}Po	Торий А	α	0,145 с	6,906	^{212}Pb
^{212}Pb	Торий В	β	10,64 ч	0,570	^{212}Bi
^{212}Bi	Торий С	β - 64 % α - 36 %	60,55 мин	2,252 6,208	^{212}Po ^{208}Tl
^{212}Po	Торий С'	α	299 нс	8,955	^{208}Pb

²⁰⁸ Tl	Торий С''	β	3,053 мин	4,999	²⁰⁸ Pb
²⁰⁸ Pb	Торий D	стабильный			

Таблица 3 – Радионуклиды семейства с атомной массой $A=4 \cdot n+2$ (ряд урана (радия))

Нуклид	Историческое название	Вид Распада	Период полураспада	Выделяемая энергия, МэВ	Продукт распада
²³⁸ U	Уран I	А	$4,468 \cdot 10^9$ лет	4,270	²³⁴ Th
²³⁴ Th	Уран X1	В	24,10 сут	0,273	²³⁴ Pam
²³⁴ Pam	Уран X2, брeвий	β - 99,84 % изомерный переход-0.16 %	1,16 мин	2,271 0,074	²³⁴ U ²³⁴ Pa
²³⁴ Pa	Уран Z	В	6,70 ч	2,197	²³⁴ U
²³⁴ U	Уран II	А	$2,46 \cdot 10^5$ лет	4,859	²³⁰ Th
²³⁰ Th	Ионий	А	$7,54 \cdot 10^4$ лет	4,770	²²⁶ Ra
²²⁶ Ra	Радий	А	1602 года	4,871	²²² Rn
²²² Rn	Радон (эманация радия)	А	3,8235 д	5,590	²¹⁸ Po
²¹⁸ Po	Радий А	α - 99,98% β - 0,02%	3,10 мин	6,115 0,265	²¹⁴ Pb ²¹⁸ At
²¹⁸ At	Астат	α - 99,90% β - 0,10%	1,5 с	6,874 2,883	²¹⁴ Bi ²¹⁸ Rn
²¹⁸ Rn	эманация астата	А	35 мс	7,263	²¹⁴ Po
²¹⁴ Pb	Радий В	В	26,8 мин	1,024	²¹⁴ Bi
²¹⁴ Bi	Радий С	β - 99,98% α - 0,02%	19,9 мин	3,272 5,617	²¹⁴ Po ²¹⁰ Tl
²¹⁴ Po	Радий С	А	0,1643 мс	7,883	²¹⁰ Pb
²¹⁰ Tl	Радий С''	В	1,30 мин	5,484	²¹⁰ Pb
²¹⁰ Pb	Радий D	В	22,3 года	0,064	²¹⁰ Bi
²¹⁰ Bi	Радий E	β - 99,99987 % α - 0,00013%	5,013 сут	1,426 5,982	²¹⁰ Po ²⁰⁶ Tl
²¹⁰ Po	Радий F, полоний	А	138,376 сут	5,407	²⁰⁶ Pb
²⁰⁶ Tl	Радий E''	В	4,199 мин	1,533	²⁰⁶ Pb
²⁰⁶ Pb	Радий G	стабильный			

Таблица 4 – Радионуклиды семейства с атомной массой $A=4 \cdot n+3$ (ряд актиния)

Нуклид	Историческое название	Вид распада	Период полураспада	Выделяемая энергия, МэВ	Продукт распада
²³⁵ U	Актиноуран	α	$7,04 \cdot 10^8$ лет	4,678	²³¹ Th
²³¹ Th	Уран Y	β	25,52 ч	0,391	²³¹ Pa
²³¹ Pa	Протактиний	α	$3,28 \cdot 10^4$ лет	5,150	²²⁷ Ac

^{227}Ac	Актиний	β - 98,62 % α - 1,38%	21,8 года	0,045 5,042	^{227}Th ^{223}Fr
^{227}Th	Радиоактиний	α	18,68 сут	6,147	^{223}Ra
^{223}Fr	Актиний К	β - 99,994 % α - 0,006 %	22,00 мин	1,149 5,340	^{223}Ra ^{219}At
^{223}Ra	Актиний Х	α	11,43 сут	5,979	^{219}Rn
^{219}At	Актиноаустат I	α - 97,0 % β - 3,0 %	56 с	6,275 1,700	^{215}Bi ^{219}Rn
^{219}Rn	Актинон (эманация актиния)	α	3,96 с	6,946	^{215}Po
^{215}Bi		β	7,6 мин	2,250	^{215}Po
^{215}Po	Актиний А	α - 99,99977 % β - 0,00023 %	1,781 мс	7,527 0,715	^{211}Pb ^{215}At
^{215}At	Актиноаустат II	α	0,1 мс	8,178	^{211}Bi
^{211}Pb	Актиний В	β	36,1 мин	1,367	^{211}Bi
^{211}Bi	Актиний С	α - 99,724 %	2,14 мин	6,751 0,575	^{207}Tl ^{211}Po
		β - 0,276 %			
^{211}Po	Актиний С'	α	516 мс	7,595	^{207}Pb
^{207}Tl	Актиний С''	β	4,77 мин	1,418	^{207}Pb
^{207}Pb	Актиний D	стабильный			

На рисунках 2 – 4 представлены цепочки распада радионуклидов рядов урана-238, урана-235 и тория-232.

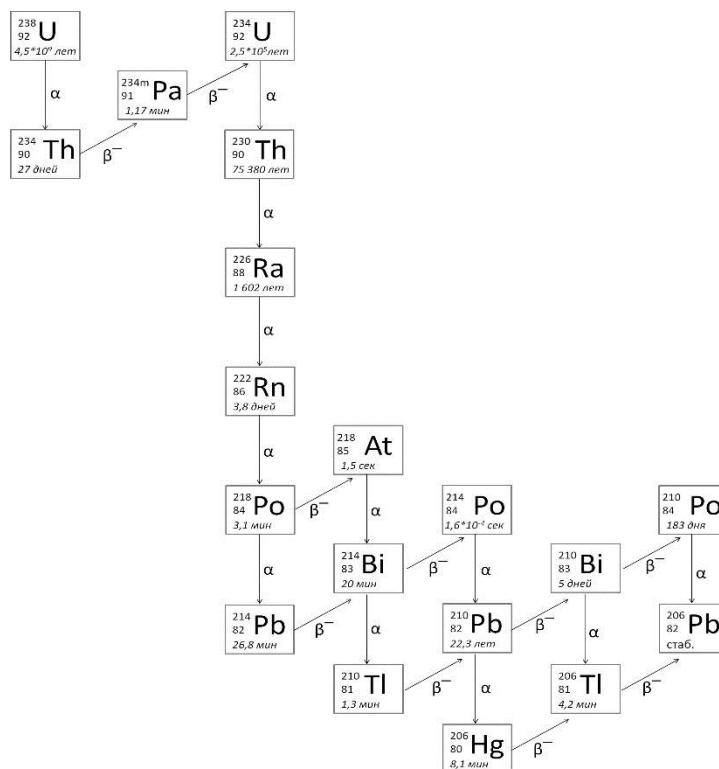


Рисунок 2 – Ряд урана-238

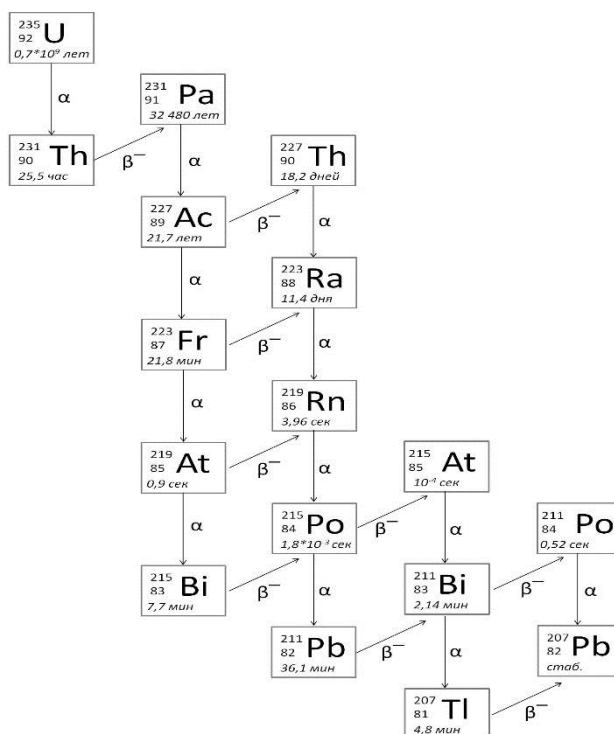


Рисунок 3 – Ряд урана-235

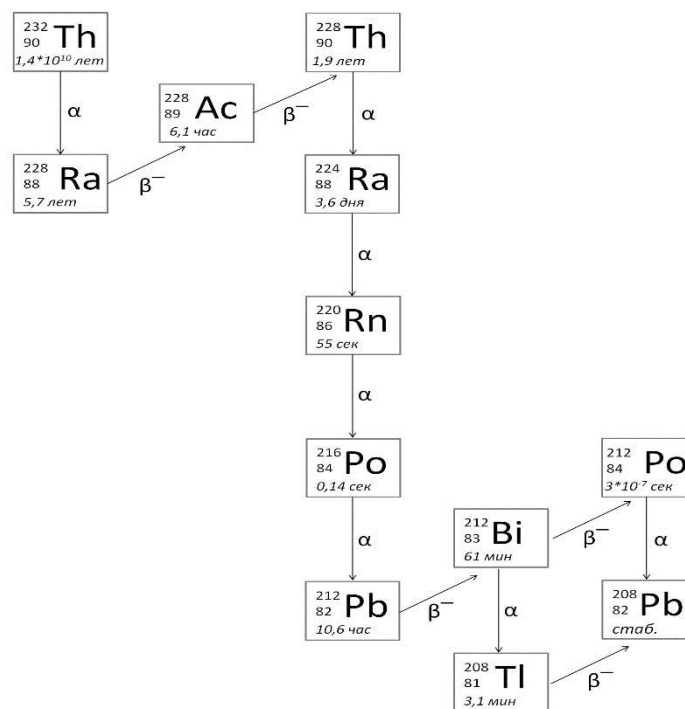


Рисунок 4 – Ряд тория-232

В естественной среде обитания основными источниками ионизирующих излучений являются РН земного происхождения уран-238, уран-235 и торий-232 и продукты их распада, а также калий-40, содержащиеся во всех оболочках Земли – литосфере, гидросфере, биосфере, атмосфере, а также космическое излучение.

ЕРН поступают в организм человека с пищей, водой и воздухом (в процессе дыхания). Основными ЕРН, формирующими дозу внутреннего облучения среднестатистического жителя территории РФ, являются продукты распада радона-222 (ряд урана-238), поступающие при вдыхании воздуха в помещениях (рисунок 5).

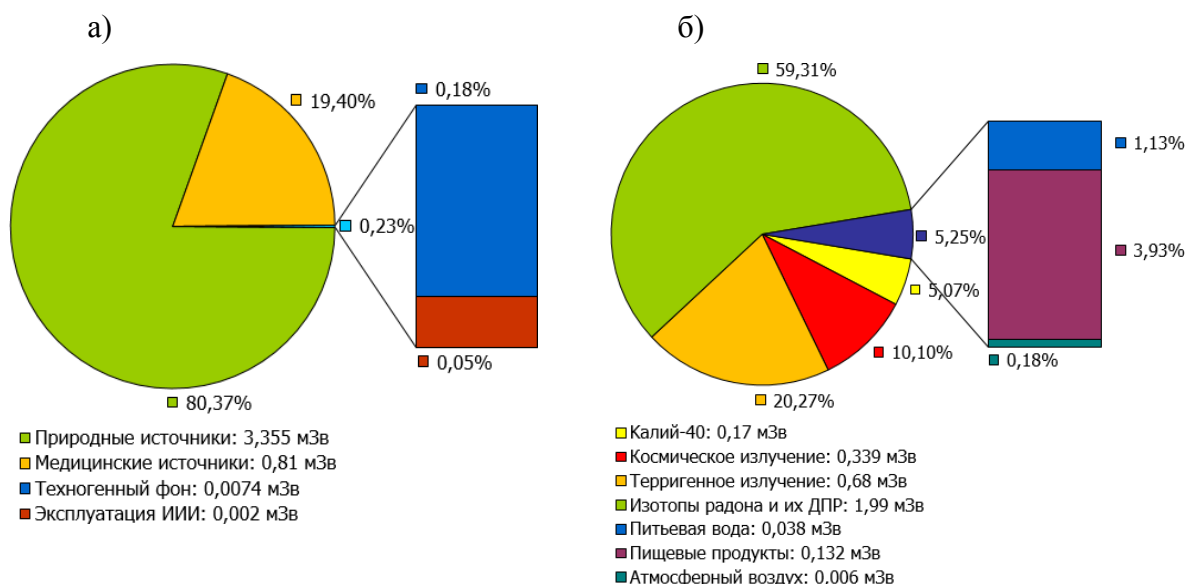


Рисунок 5 – а) – вклад в годовую дозу облучения населения РФ природных и техногенных источников облучения; б) – соотношение вкладов отдельных составляющих природного фона в суммарную дозу облучения населения РФ за счет всех природных источников излучения [5]

Территории, прилегающие к местам добычи урановых руд, характеризуются повышенным содержанием ЕРН уранового ряда. За счет этого увеличиваются составляющие дозы облучения населения за счет вдыхания радона и их дочерних продуктов распада (ДПР) (см. рисунок б). Кроме того, в случае организации водоснабжения из подземных источников возможно повышенное облучение за счет поступления РН с питьевой водой. Подземные воды в районах добычи урановых руд могут содержать повышенные концентрации РН уранового ряда за счёт процессов выщелачивания урана и радия из горных пород и эманирования радона. На рисунке 7 представлены распределения суммарной альфа-активности и суммарной бета-активности в водозаборных скважинах города Краснокаменск (Забайкальский край). Обращает на себя внимание факт значительного превышения уровня вмешательства суммарной альфа-активностью, а также нехарактерное для источников водоснабжения превышение значений альфа-активности над бета-активностью.

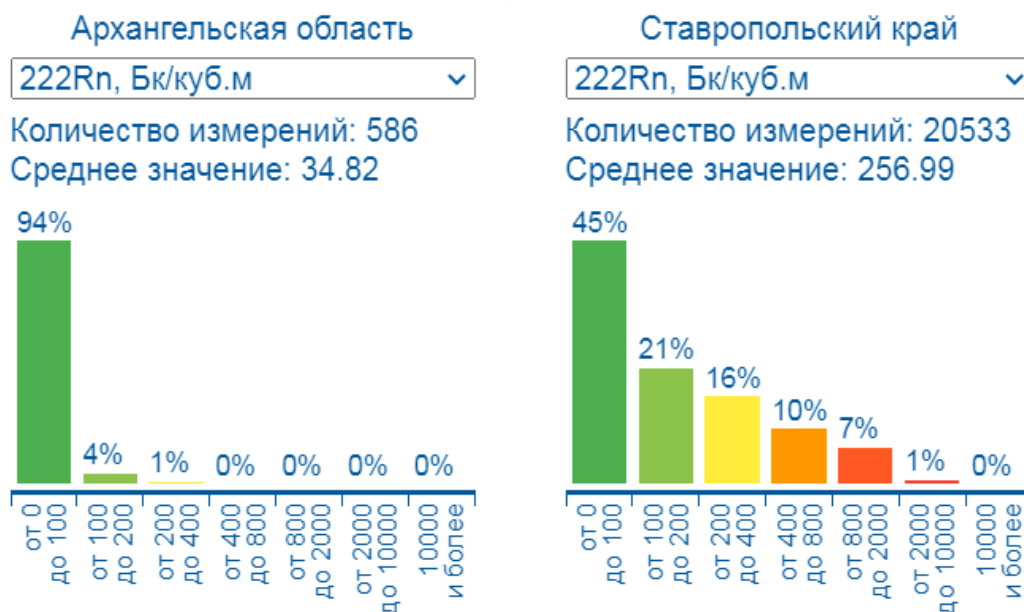


Рисунок 6 – Распределения результатов измерений ОА радона в жилых и производственных помещениях из базы ИАС ПИИИ, построенные для двух регионов: Архангельской области – слева и района Кавказских минеральных вод Ставропольского края¹ – справа

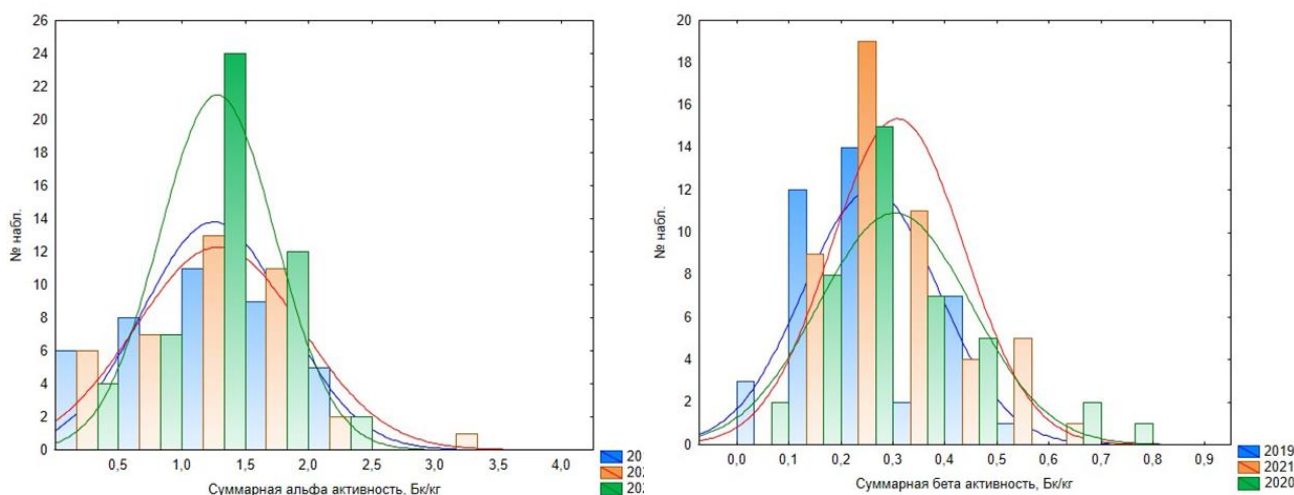


Рисунок 7 – Распределение результатов измерений суммарной удельной альфа- и бета-активности в питьевой воде различных источников водозабора города Краснокаменск. Построено по данным обследований за 2019-2021 гг.

Добыча и переработка урановых руд также являются дополнительным источником облучения населения. Образующиеся в процессе производства отвалы являются источниками ионизирующих излучений, а изменения

¹ Районы гор Бык и Бештау Кавказских минеральных вод характеризуются повышенным содержанием урана. Разработки уранового месторождения на г. Бештау производились во второй половине XX века шахтным способом.

кислотности подземных вод за счет применения технологий подземного выщелачивания (ПВ), может приводить к изменению миграционной способности ЕРН.

1.2.Химические свойства урана

Химически уран весьма активен. Он быстро окисляется на воздухе и покрывается радужной плёнкой оксида. Уран может проявлять в водных растворах степени окисления от +3 до +6, вне контакта с водой наблюдается также степень окисления +2 [6]. Уран может проявлять степени окисления от +3 до +6 (Таблица 5).

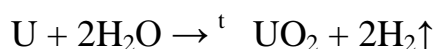
Таблица 5 – Степени окисления урана

Степень окисления	Оксид	Гидроксид	Характер	Форма	Примечание
+3	Не существует	Не существует	-	U^{3+} , UH_3	Сильный восстановитель
+4	UO_2	Не существует	Основной	UO_2 , галогениды	
+5	Не существует	Не существует	-	Галогениды	В воде диспропорционирует
+6	UO_3	$UO_2(OH)_2$	Амфотерный	UO_2^{2+} (уран) UO_4^{2-} (уранат) $U_2O_7^{2-}$ (диуранат)	Устойчив на воздухе и в воде

Полная электронная конфигурация атома урана:
 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6 5f^3 6d^1 7s^2$.

Мелкий порошок урана самовоспламеняется на воздухе, он загорается при температуре 150—175 °С, образуя U_3O_8 .

Уран взаимодействует с водой, вытесняя водород, медленно при низкой температуре, и быстро при высокой, а также при мелком измельчении порошка урана:



В кислотах-неокислителях уран растворяется, образуя UO_2 или соли U^{4+} (при этом выделяется водород). С кислотами-окислителями (азотной, концентрированной серной) уран образует соответствующие соли уранила UO_2^{2+} . С растворами щелочей уран не взаимодействует.

1.3. Распространение урана в природе

Уран достаточно широко распространен в природе, кларк урана составляет 0,0003 % (вес.), концентрация в морской воде – 3 мкг/л. Количество урана в слое литосферы толщиной 20 км оценивается в $1,3 \cdot 10^{14}$ т.

Количество урана в земной коре примерно в 1000 раз превосходит количество золота, в 30 раз — серебра, при этом данный показатель приблизительно равен аналогичному показателю у свинца и цинка. Немалая часть урана рассеяна в почвах, горных породах и морской воде. Только относительно небольшая часть концентрируется в месторождениях, где содержание данного элемента в сотни раз превышает его среднее содержание в земной коре [7]. По оценке 2015 года разведанные мировые запасы урана в месторождениях составляют более 5,7 млн. тонн. На рисунке 8 представлено распространение урановых запасов (месторождений) в мире.

Основная масса урана находится в кислых породах с высоким содержанием кремния. Значительная масса урана сконцентрирована в осадочных породах, особенно богатых органикой. В больших количествах как примесь уран присутствует в ториевых и редкоземельных минералах (алланит, монацит, циркон, ксенотим и др.). Важнейшими урановыми рудами являются настуран (урановая смолка, уранинит) и карнотит. Основными минералами-спутниками минералов урана являются молибденит, галенит, кварц, кальцит, гидромусковит и др.

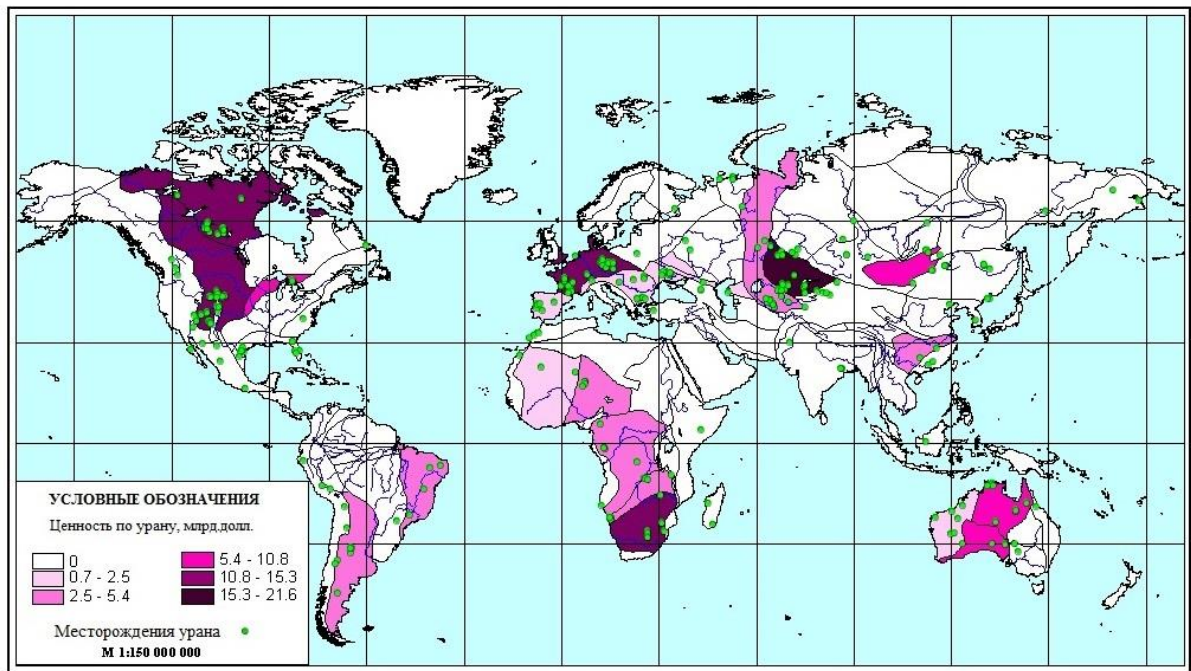


Рисунок 8 – Распространение урановых запасов (месторождений) в мире

1.4. Добыча урана в мире

На рисунке 9 показаны основные месторождения урана и объемы добычи по данным Всемирной ядерной ассоциации на 2004 г.

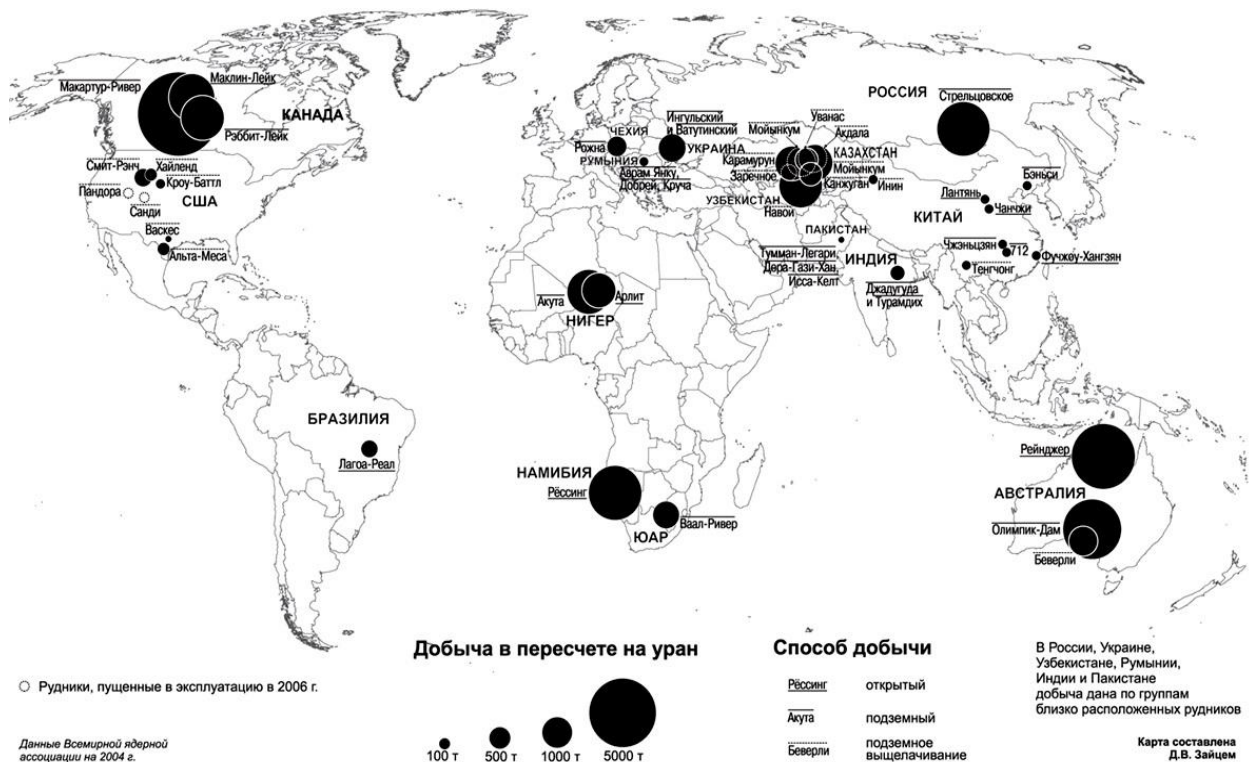


Рисунок 9 – Основные месторождения урана и объемы добычи [8]

В таблице 6 представлены данные по добыче урана (в тыс. тонн) за 2009 – 2017 гг. По величине добычи на своей территории наша страна занимает скромное шестое место, но при этом ей принадлежит несколько ключевых добывающих предприятий в Казахстане, Узбекистане, Канаде и ряде других стран. После приобретения в августе 2023 г. Буденновского месторождения в Казахстане АО «Росатом» вышел на второе место в мире по запасам урана и входит в тройку лидеров по всем переделам в ядерном топливном цикле.

Таблица 6 – Добыча урана (тыс.тонн) в различных странах в период 2009 – 2017 гг.

№	Страна	2009 год	Страна	2012 год	Страна	2015 год	Страна	2017 год
1	Казахстан	14 020	Казахстан	19 451	Казахстан	23 800	Казахстан	23 391
2	Канада	10 173	Канада	9145	Канада	13 325	Канада	13 116
3	Австралия	7982	Австралия	5983	Австралия	5654	Австралия	5882
4	Намибия	4626	Нигер	4351	Нигер	4116	Намибия	4224
5	Россия	3564	Намибия	3258	Намибия	2993	Нигер	3449
6	Нигер	3234	Узбекистан	3000	Россия	3055	Россия	2917
7	Узбекистан	2429	Россия	2993	Узбекистан	2385	Узбекистан	2404
8	США	1453	США	1537	Китай	1616	Китай	1885
9	Китай	1200	Китай	1500	США	1256	США	940
10	Украина	840	Украина	890	Украина	1200	Украина	550
11	Другие страны	1251	Другие страны	6385	Другие страны	904	Другие страны	704
	Итого	50772		58493		60304		59462

На ситуацию с добычей урана значительно повлияла авария на АЭС «Фукусима» в 2011 году. После этого ряд стран начали сворачивать строительство атомных станций, Германия и Италия взяли курс на полный отказ от атомной энергетики. Цены на урановое сырье упали и в минимуме составляли менее 50 долларов за килограмм, что повлекло за собой снижение добычи урана в ряде стран. Однако основные потребители урана не изменили своих планов ускоренного развития атомной отрасли (США, Китай, Индия, Россия, Франция, Англия, Швеция) [9].

По существующим прогнозам, до 2030 г. потребности в уране в мире могут возрасти с 69 до 105 тыс.т и за весь период составят до 1600 тыс.т,

производство природного урана увеличится с 57 до 83 тыс.т, дефицит природного урана к 2030 г. достигнет 220 тыс. т и будет компенсироваться ураном из вторичных источников [7]. По прогнозу Всемирной ядерной ассоциации (WNA) потребности в уране к 2040 г. достигнут 100 тыс. т [10]. На рисунке 10 показаны основные тенденции в развитии добычи и потребления урана.

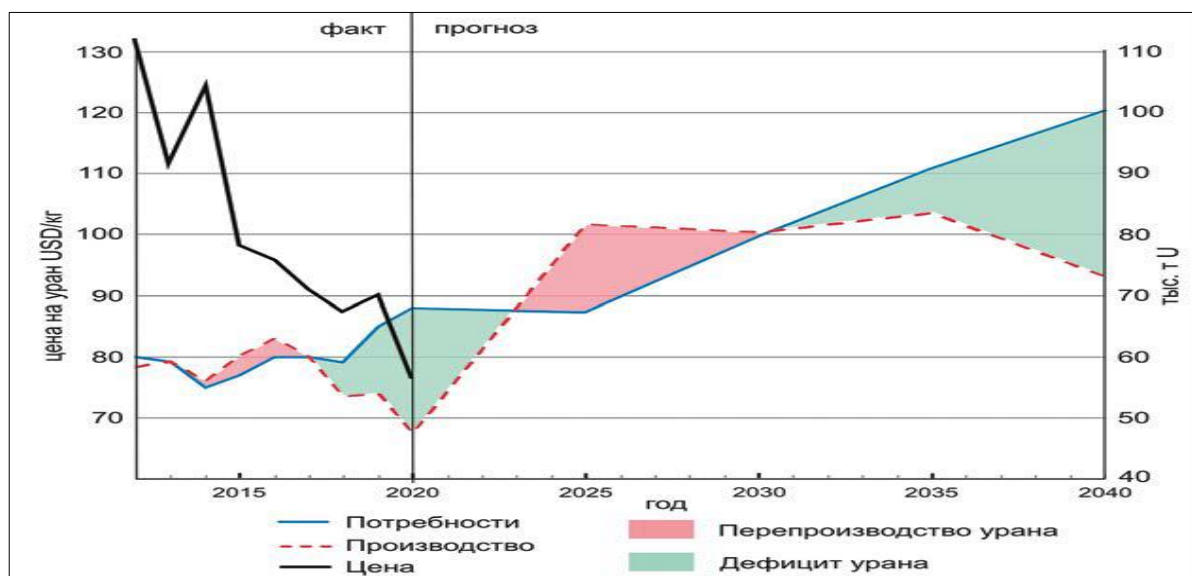


Рисунок 10 – Соотношение потребностей, производства и цены на уран в 2012–2040 гг. [7]

С середины августа до 22 сентября 2021 г. спотовые цены на уран выросли с 88 до 131,3 USD/kg. В апреле 2022 г. цена на уран достигла максимума 168 USD/kgU, но к маю снизилась до 140 USD/kgU [7]. К 2019 г. складские запасы урана в странах ЕС достигли 49912 т, США — 50200 т, Китая — 139000 т. ЕС имеет контракты на поставку урана с 11 странами, США — с 7 странами. В обоих случаях ведущую роль по поставкам урана играла Россия [7].

К середине XXI века добыча урана в мире, при существующих месторождениях и технологиях добычи, должна существенно сократиться. Поскольку до сих пор в существующих технологиях уран эффективно использовался лишь на 15 – 20 %, основой долгосрочного развития ядерной энергетики должны стать реакторы-размножители (бридеры) на быстрых нейтронах с применением новых видов топлива (МОКС, СНУП, РЕМИКС),

позволяющие увеличить ресурсную базу ядерной энергетики во много раз благодаря включению в топливный цикл изотопов плутония, урана-238 и тория-232. Однако существенный вклад этих новых технологий в ядерную энергетику можно ожидать не раньше 2030 – 50 гг.

1.5. Добыча урана в России

Лидирующие позиции нашей страны в переработке и обогащении урана (более 40% мирового объема), делает наращивание собственной добычи уранового сырья весьма насущной задачей. На рисунке 1.12 показаны основные месторождения урана на территории РФ. После распада Советского Союза более 80% запасов урана, в том числе сосредоточенные в крупнейших месторождениях, оказались за пределами России. В то же время Россия сохранила более 60% мощностей действующих АЭС и перерабатывающих мощностей и продолжает вводить в строй новые блоки атомных станций. Доля АЭС в производстве электроэнергии в РФ составляет 16%. Однако даже современное производство уранового сырья обеспечивает лишь около 20% внутренних и экспортных потребностей. Остальная их часть покрывается за счет складских запасов урана, которые могут быть исчерпаны в ближайшие 10-15 лет. При этом имеющаяся минерально-сырьевая база урана не может в настоящее время обеспечить его производство на необходимом уровне - около 20 тыс. тонн в год.

В России современное состояние сырьевой базы урана характеризуется полным отсутствием ресурсов с себестоимостью <40 USD/кг, низкой долей ресурсов <80 USD/кг (7%) и преобладанием ресурсов, с себестоимостью 80-130 USD/кг (68%) [11]. Вместе с тем, запасы природного урана России в целом достаточны для необходимого роста его производства.

Освоение запасов ценовой категории 80-130 USD/кг U, при снижении себестоимости путем усовершенствования технологии добычи и переработки руд, позволит довести к 2030 г. годовое производство урана в России до 20 тыс. т, что вместе с импортом, главным образом из Казахстана, обеспечит полные потребности страны в уране.

Отношение к урановой отрасли в стране неоднократно изменялось. Минатом РФ планировал в 2001 г. довести мощность реакторов до 90 ГВт и добычу урана до 18 тыс. т. К 2009 г. был достигнут максимум ассигнований на поисково-разведочные работы на уран — 294 млн USD. Были взяты лицензии на разведку и отработку золотоурановых месторождений Эльконского рудного района и нескольких месторождений Забайкалья.

Но к 2013 г. политика Росатома резко изменилась, и бюджетные ассигнования снизились к 2019 г. до 9,4 млн USD. В этих условиях производство урана в России уже многие годы находится на низком уровне, не поднимаясь выше 3 тыс. т, недостаточном даже для снабжения собственной ядерной энергетики (таблица 7) [12].



Рисунок 11. – Схема размещения урановорудных объектов и перспективных площадей добычи урана [12]

Таблица 7 – Производство урана в России (2014–2019) [12]

Организация	Способ добычи	2014	2015	2016	2017	2018	2019
ПАО «ППГХО»	Горный, КВ	1970	1977	1883	1631	1456	1300
АО «Далур»	СПВ	578	590	592	592	590	595
АО «Хиагда»	СПВ	443	488	540	694	858	1016

Всего	2981	3055	3005	2917	2904	2911
-------	------	------	------	------	------	------

Трудности прогноза потребностей ядерной энергетики России в добыче уранового сырья в настоящее время связаны с неопределенностью электропотребления, конкуренцией с другими источниками энергии, ограничениями избыточных мощностей реакторов, нестабильностью международной обстановки, влияющей на экспорт сырья. Тем не менее, необходимость развития уранодобывающей отрасли на действующих и перспективном Эльконском месторождениях, не вызывает сомнений.

Распределение запасов и прогнозных ресурсов урана по территории России неравномерно. Почти 90% запасов урана сосредоточено в трех регионах: Республике Саха (Якутия), Забайкальском крае и Республике Тыва. При этом, более половины российских запасов урана (382,8 тыс. т) заключено в 17 месторождениях Эльконского урановорудного района в Республике Саха (Якутия), представленных штокверковыми золото-урановыми рудами в зонах калиевых метасоматитов («метасоматический» тип по классификации МАГАТЭ) [13]. Запасы крупнейшего из них, месторождения Дружное составляют 13% российских (95,8 тыс. т); другие значимые месторождения района — Эльконское плато, Северное, Курунг, Непроходимое, Элькон — заключают от 40 до 62 тыс. т урана каждое. Однако содержание урана в их рудах невелико и варьирует от 0,112 до 0,355%. В Забайкальском крае в 15 молибден-урановых жильно-штокверковых месторождениях в вулканических породах («вулканитовых») Стрельцовского урановорудного района заключено 16,5% запасов (118,4 тыс. т) урана Российской Федерации. Объекты, как правило, крупные или средние по масштабу, с концентрацией урана в рудах 0,081–0,215%, что значительно выше, чем в аналогичных зарубежных месторождениях [13].

В настоящее время основная масса добычи урановой руды приходится на три предприятия, входящие в состав компании «Атомредметзолото» [14]:

- Приаргунское производственное горно-химическое объединение (ППГХО имени Е.П Славского) в Забайкальском крае, г. Краснокаменск (Стрельцовский рудный район),
- АО «Хиагда» в Бурятии (Витимский рудный район)
- АО «Далур» в Курганской области (Зауральский рудный район).

В этих трех крупнейших рудных районах выпускается (добывается и перерабатывается) более 90 % продукции страны.

Расположенное в южной части Забайкальского края Стрельцовское рудное поле с центром в г. Краснокаменск, включает более десяти месторождений урановых и молибденово-урановых месторождений, пригодных под шахтный и карьерный способы добычи. Добыча урана ведется шахтным способом, а также методом подземного выщелачивания на месторождениях Аргунское, Жерловое и еще ряде более мелких месторождений, обеспечивая 93% всей добычи урана России [14].

В Витимском рудном районе силами АО «Хиагда» в настоящее время развернута добыча урана методом ПВ на месторождениях Источное и Вершинное, ведутся работы по освоению Дыбрынского и Количиканского месторождений [15].

В Зауральском рудном районе добыча ведется силами АО «Далур» методом ПВ на месторождениях Далматовское и Хохловское, в 2020 году были окончены геологоразведочные работы и начато составление проекта добычи на месторождении Добровольное [14].

В качестве наиболее перспективного района добычи урана в ближайшем будущем рассматривается, прежде всего, Эльконский рудный район в Южной Якутии [14]. Крупнейшие месторождения района – Дружное, Эльконское плато, Северное, Курунг, Непроходимое, Элькон. Для отработки крупных месторождений Эльконского ураново-рудного района в 2007 году создано АО «Эльконский ГК». На базе месторождений зоны Южная планируется создать одно из крупнейших в мире уранодобывающих предприятий. Прогнозируемые запасы урановой руды Эльконского рудного

района — 346 000 т, что превышает все запасы России, подтвержденные на сегодняшний день. Начиная с 2012 г. компания АО «Лунное» совместно с ОАО «Золото Селигдара» обрабатывает золото-урановое месторождение Лунное, входящее в Эльконскую группу. В 2016 г. на месторождении было добыто 54 т урана, что сопоставимо с результатами предыдущего года. Основная деятельность предприятия связана с добычей руд драгоценных металлов и извлечением золота и серебра методом кучного выщелачивания [13].

Кроме того, на стадии разработки сейчас находятся месторождение Малиновское (Западная Сибирь), а также относительно небольшие месторождения урана, расположенные в Карелии у побережья Ладожского и Онежского озер, прежде всего, месторождения Карку и Средняя Падма [13].

Сравнительная характеристика поступления загрязняющих веществ в окружающую среду от трех действующих в настоящее время предприятий, по добыче и переработке урановой руды (ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского», АО «Далур» и АО «Хиагда») по опубликованным отчетам по экологической обстановке на предприятиях ГК «Росатом» дана в Приложениях А и Б.

2. ТЕРРИТОРИИ ДОБЫЧИ УРАНОВЫХ РУД В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

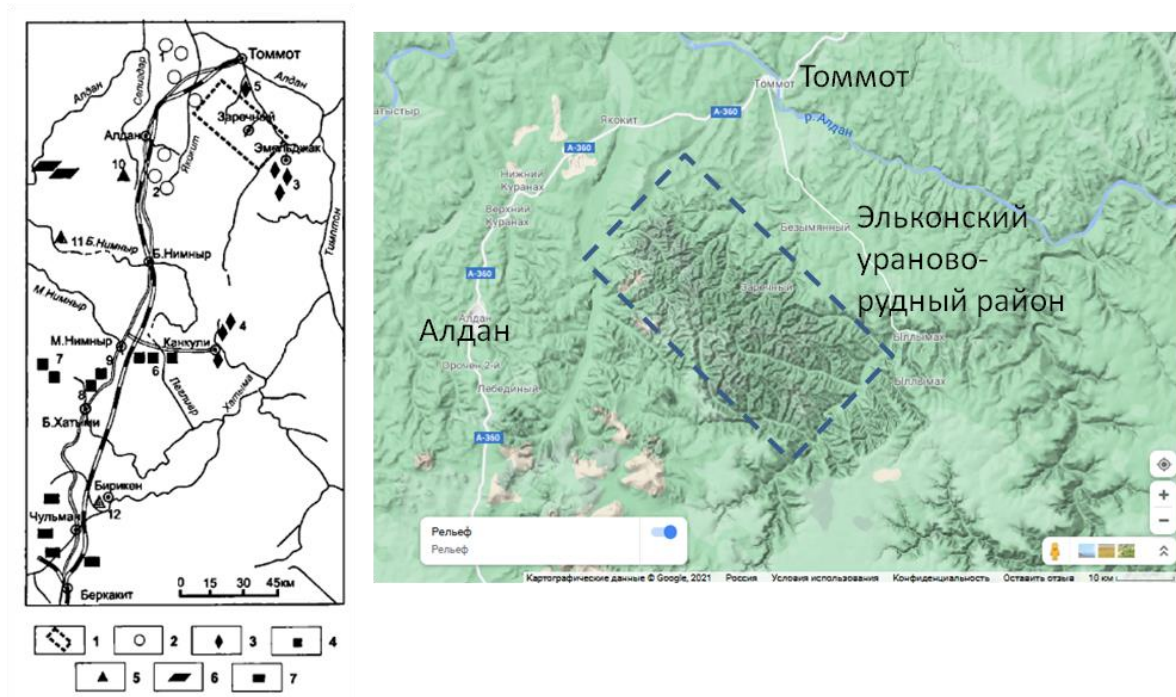
2.1. Эльконский рудный район

2.1.1. Общая характеристика района

Эльконский урановорудный район расположен в южной части Республики Саха (Якутия), в пределах Эльконского сводово-глыбового поднятия, имеющего горный рельеф с перепадом абсолютных высот от 650 до 1400 м и широким развитием курумников [16]. Климат резко континентальный, холодный и супергумидный. Годовое количество осадков составляет 635 мм, а испаряемость – 336 мм. Растительность – горнотаёжная. Местами развита многолетняя мерзлота мощностью от десятков до первых сотен м. Сезонная мерзлота повсеместна; зимнее промерзание колеблется от 1,5 до 4-5 м. Экономически Эльконский район находится в пределах Центрально-Алданского горнопромышленного района, содержащего крупные месторождения золота, железных руд, флогопита, апатита, пьезосырья и других полезных ископаемых (рисунок 12). Центрально-Алданский район является одним из старейших районов золотодобычи в России, но в настоящее время наиболее крупные месторождения золота здесь полностью или в значительной степени отработаны. Ближайший населённый пункт (40 км) – г. Томмот, расположенный на Алдано-Якутской авто-магистрали (АЯМ) и являющийся конечным пунктом ж.-д. ветки Сквородино - Чульман-Томмот протяжённостью 710 км [16].

Урановые месторождения Эльконского района открыты в начале 60-х годов. Однако освоение района не было начато в связи с тем, что почти одновременно с Эльконским в СССР были выявлены и затем вовлечены в отработку Стрельцовский и Кировоградский урановорудные районы, находящиеся в значительно лучших географо-экономических условиях. В настоящее время, когда большинство урановорудных районов СССР оказались за рубежами России, освоение Эльконского района стало

необходимостью. Кроме того, экономическая инфраструктура района в последние годы значительно улучшилась в связи со строительством железной дороги Сковородино-Якутск. Рабочее движение по ней уже осуществляется до г. Томмот, расстояние от которого до месторождений Эльконского района составляет 35-80 км [16].



1 - Эльконский урановорудный район; 2 - месторождения золота (1 - Куранахская группа, 2 - Лебединская группа); 3 - месторождения флогопита (3 - Эмельджакская группа, 4 - Канкунская группа, 5 - Эльконское); 4 - железорудные месторождения (6 - Таёжная группа, 7 - Дёсовская группа, 8 - Пионерское, 9 - Сивагли); 5 - апатитовые месторождения (10 - Селигдарское, 11 - Хардагасское, 12 - Берикен); 6 - Перекатная группа месторождений пьезосырья; 7 - угольные месторождения Нерюнгринско-Чульманского бассейна

Рисунок 12 – Обзорная карта Центрально-Алданского горнопромышленного района

Общая протяженность рудоносных структур на Эльконском горсте превышает 1000 км. Главной урановорудной структурой является зона Южная, которая имеет протяженность около 25 км и включает в себя шесть месторождений: Элькон, Эльконское плато, Курунг, Непроходимое, Дружное, Минеевское. Согласно литературным источникам, Южную зону приходится около 75% запасов урана всей группы месторождений. Помимо этого, в районе выделяются месторождения Северное, Таежное, Снежное, Агдинское и др. (рисунок 13)

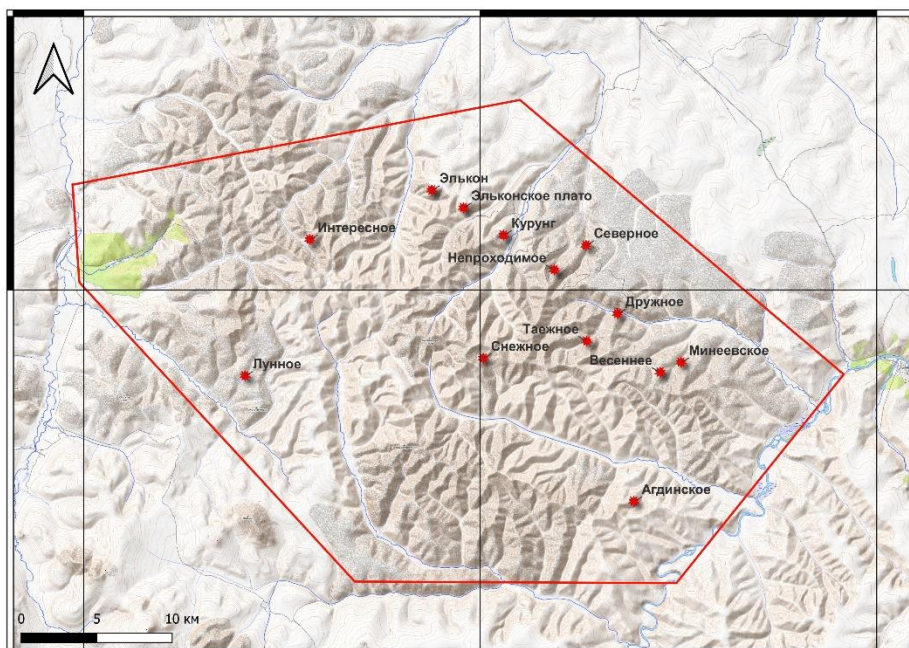


Рисунок 13 – Расположение месторождений Эльконской группы

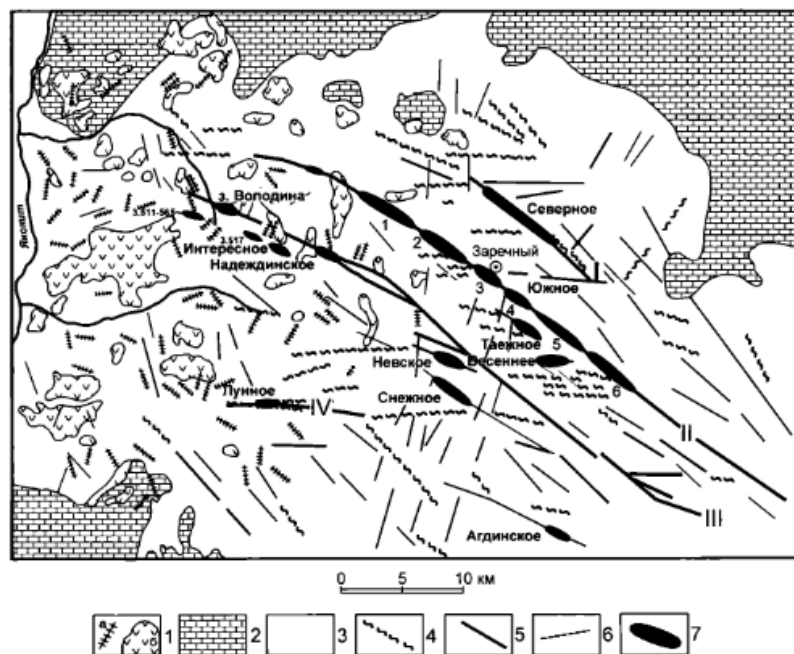
Карта месторождений составлена на основе карты-схемы из статьи [17] при помощи функции привязки растров в QGIS.

2.1.2. Геологическое строение

В геологическом плане район находится в центральной части Алданского щита, в области погружения кристаллического фундамента под кембрийские образования осадочного чехла Сибирской платформы. Он располагается в пределах древнейшего гигантского купольного сооружения - Алдано-Тимптонского мегаантиклинория. В мезозойское время, в результате дифференцированных блоковых движений, здесь возникли системы сопряжённых грабенов и сводово-глыбовых поднятий, одним из которых является Эльконский горст, пространственно отвечающий одноимённому рудному району [18].

Эльконский горст вытянут в северо-западном направлении почти на 60 км, при ширине 30-40 км. Он сложен сильно дислоцированными архейскими гнейсово-сланцевыми толщами, относимыми к верхнеалданской и федоровской свитам иенгской серии. Имеющая здесь ограниченное распространение верхнеалданская свита представлена квар-цитами, высокоглиноземистыми и пироксеновыми плагиогнейсами и

плагиосланцами; федоровская свита сложена пироксен-амфиболовыми и биотитовыми плагиогнейсами и плагиосланцами. Породы гнейсово-сланцевой толщи метаморфизованы в гранулитовой и амфиболитовой фациях (рисунок 14).



1 - дайки (а) и малые интрузии (б) мезозойского комплекса щелочноземельного и щелочного состава; 2 - платформенные карбонатные отложения кембрия; 3 - метаморфические и гранитоидные комплексы Алданского щита; 4 - древние зоны бластомилонитов; 5 - древние разломные зоны, омоложенные в мезозое (I - Северная, II - Южная, III - Сохсолоохская, IV - Федоровская); 6 - мезозойские тектонические зоны; 7 - основные урановые месторождения и их названия (цифрами обозначены участки месторождения Южное: 1 - Элькон, 2 - Эльконское плато, 3 - Курунг, 4 - Непроходимый, 5 - Дружный, 6 - Минеевский)

Рисунок 14 – Геолого-структурная карта Эльконского урановорудного района [16]

На горсте прослежено более 400 тектонических зон, различных по ориентировке, протяжённости, времени заложения, соотношению слагающих их структурных элементов. Выделяются региональные ослабленные зоны, протягивающиеся по простиранию на десятки километров и обладающие шириной от сотен метров до первых километров - полосы Южного, Сохсолоохского и Юхухтинского разломов. Зоны имеют северо-западную ориентировку и подчиняются общему плану складчатых структур. Подавляющее большинство мезозойских и омоложенных в мезозое древних разломных зон содержит урановое оруденение, относимое к золото-

урановому типу в долгоживущих разломах областей мезозойской тектоно-магматической активизации.

Урановое оруденение локализовано в приразломных пирит-карбонат-калишпатовых метасоматитах и образует крупные плитообразные залежи протяженностью по простиранию и падению от десятков до сотен метров. Средние содержания урана в рудах 0,10 - 0,16% [16]. Главными урановыми минералами здесь являются собственно урановая разновидность титаната урана - браннерита и продукты его преобразования в зоне гипергенеза [20]. Подчиненную роль играют коффинит, уранинит и вторичные минералы – урановые слюдки, гидроокислы и ванадаты урана. Постоянным спутником урана в рудах месторождений Эльконского района является золото, среднее содержание которого в урановых рудах составляет 0,5 - 2,0 г/т [21].

2.1.3. Радиоэкологическая обстановка

Значительные площади природных ландшафтов в исследуемом районе были нарушены в ходе проведения геолого-разведочных работ на радиоактивное сырье. Основная часть крупномасштабных геолого-поисковых работ была проведена здесь в последней трети XX века. В ходе этих работ по данным Госатомнадзора Дальневосточного округа РФ в процессе детальной геологической разведки было извлечено из недр и складировано на дневную поверхность в виде отвалов более 1 млн. т горнорудной массы. Большая часть отвалов приурочена к ложбинам стока и днищам долин горных рек. Общее количество урана, содержащегося в данной рудной массе, составляет около 2000 т [22]. В условиях горного рельефа, холодного и гумидного климата исследуемой территории отвалы горных пород, образованные в ходе геолого-разведочных работ, неравномерно размещенные на площади около 500 км², являются основным источником радиоактивного загрязнения почвенно-растительного покрова и поверхностных вод. Максимальные значения содержания урана, радия и радона в изученных поверхностных водах соответственно составляют $180 \cdot 10^{-7}$ г/л (0,22 Бк/л), $4,7 \cdot 10^{-12}$ г/л (0,17 Бк/л) и 256,8 Бк/л, что в десятки и

даже сотни раз превышает их фоновые концентрации в водах естественных ландшафтов. По результатам специальных исследований [22], мощность экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД) на поверхности отвалов в рудной зоне Южная колеблется в пределах 11 – 2 150 мкЗв/ч. Наиболее активные отвалы расположены в бассейне реки Курунг, где в отдельных точках значения МЭД гамма-излучения достигают 3 000 мкЗв/ч. Содержание урана в мелкоземе отвалов горных пород достигает 1 888 мг/кг (примерно 23 000 Бк/кг), при фоновых значениях, характерных для приповерхностных горных пород данного района, 0,9 - 5,8 мг/кг (10-70 Бк/кг). Значения эффективной удельной активности ЕРН ($A_{эфф}$) в материале отвалов достигают 20 441-23 640 Бк/кг [22].

По результатам измерений ОА радона в помещениях города Алдан, расположенного в пределах Эльконского рудного района, концентрация радона в домах колебалась в зимний период от 30 до 2 036 Бк/м³ при среднезимнем значении 317 Бк/м³ (135 измерений). Летом концентрация радона в домах изменялись от 34 до 420 Бк/м³ при среднелетнем значении 174 Бк/м³ (44 измерения). Среднегодовое значение составило 282 Бк/м³. Таким образом, в зимний период пиковые значения концентрации радона в домах г. Алдан примерно в 5 раз превышают допустимые уровни для жилых помещений (НРБ-99/2009) [23].

В период с 2007 по 2011 год ОАО «ВНИПИпромтехнологии» провели ряд радиоэкологических исследований на территории месторождений Эльконского урановорудного района, а именно. В 2007 году произвели γ -съемку на территории проектируемых площадок и существующих отвалов, шахт и штолен. По данным фоновой γ -съемки района значения МЭД варьируются от 0,08 мкЗв/ч до 0,39 мкЗв/ч. Минимальные значения МЭД зафиксированы над выходами на поверхность пород карбонатного состава, а максимальные над выходами гранитоидов. Среднее значение фоновой МЭД составило 0,18 мкЗв/ч, при доверительной вероятности $P=0,95$. При проведении обследования проводилась γ -съемка проектируемых

производственных площадок: центральная промплощадка, хвостохранилище на р. Курунг, жилпосёлок и верховье р. Кене-Салаа. Значения МЭД на этих территориях варьируются от 0,09 до 0,26 мкЗв/ч [24].

При проведении γ -съёмки отвалов обследовали отвал шахты 3 на правом берегу р. Акин, отвал шахты 2 и отвалы штолен № 5, 6 и 18. Отвалы штолен № 5, 6 и 18 представлены практически обедненной породой, и величина МЭД не превышает фоновых значений. Максимальные значения зафиксированы на отвалах 3 и 2 шахты и составили 13,27 и 13,32 мкЗв/ч, что значительно превышает фоновые значения. Такие значения объясняются наличием в отвалах рудного материала. Проведенные γ -спектрометрические измерения показали, что почвы и грунты, характеризующиеся повышенными значениями МЭД характеризуются и высокими содержаниями калия, тория и урана (по радию), на основании чего можно сделать вывод о том, что радиационный фон территории формируется γ -излучением ЕРН [24].

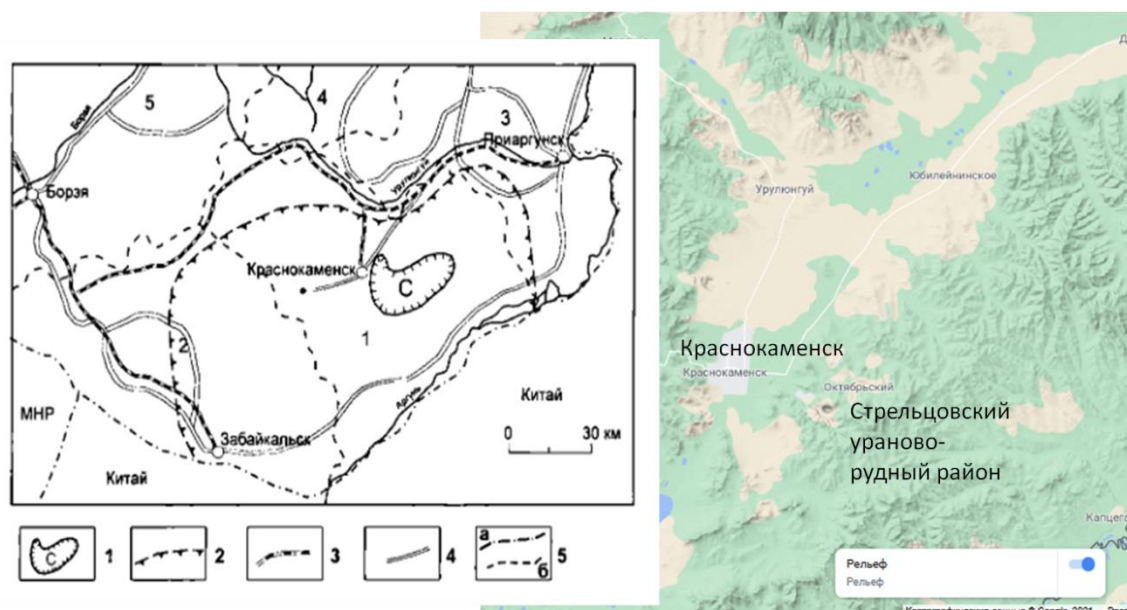
В 2011 году специалистами «ВНИПИПромтехнологии» провели радиохимический анализ проб снега, воды, почвы и донных отложений. Исследовано 6 проб снега, 15 проб воды, 14 проб донных отложений и 6 проб почвы. В пробах снега определили следующие РН: ^{238}U , ^{230}Th , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra . Активность этих РН в единицах Бк/л не превышает уровней вмешательства (УВ). Те же результаты были получены при радиохимическом анализе донных отложений и подземных и поверхностных вод (для донных отложений УВ не установлены). При радиохимическом анализе проб почвенного покрова было установлено, что активность ЕРН в пробах незначительно превышает фоновые значения [24].

2.2. Стрельцовский рудный район

2.2.1. Общая характеристика района

Стрельцовский (Приаргунский) рудный район в настоящее время является единственным в России, где силами ППГХО имени Е.П. Славского осуществляется крупномасштабная добыча и переработка природного урана

на уровне 3,2-3,3 тыс. т в год. Район выявлен и разведан в период 1963-1981 гг. Он включает 20 жильно-штоковерковых молибден-урановых месторождений, общие запасы урана в которых изначально составляли порядка 300 тыс. т [16]. Месторождения Тулукуевское и Красный камень отработаны, месторождения Аргунское, Жерловое, Стрельцовское, Антей, Октябрьское, Мартовское, Лучистое активно разрабатываются подземным способом, остальные находятся в резерве. Остаточные запасы урана в рудном районе - 155 тыс. т при среднем его содержании 0,155% [16].



1 - Стрельцовский урановорудный узел; 2 - контур Урулюнгуевского урановорудного района; 3 - железные дороги; 4 - автодороги; 5 - границы: а - государственные, б - административных районов (1 - Краснокаменский, 2- Забайкальский, 3 - Приаргунский, 4 - Александровозаводский, 5 - Борзинский).

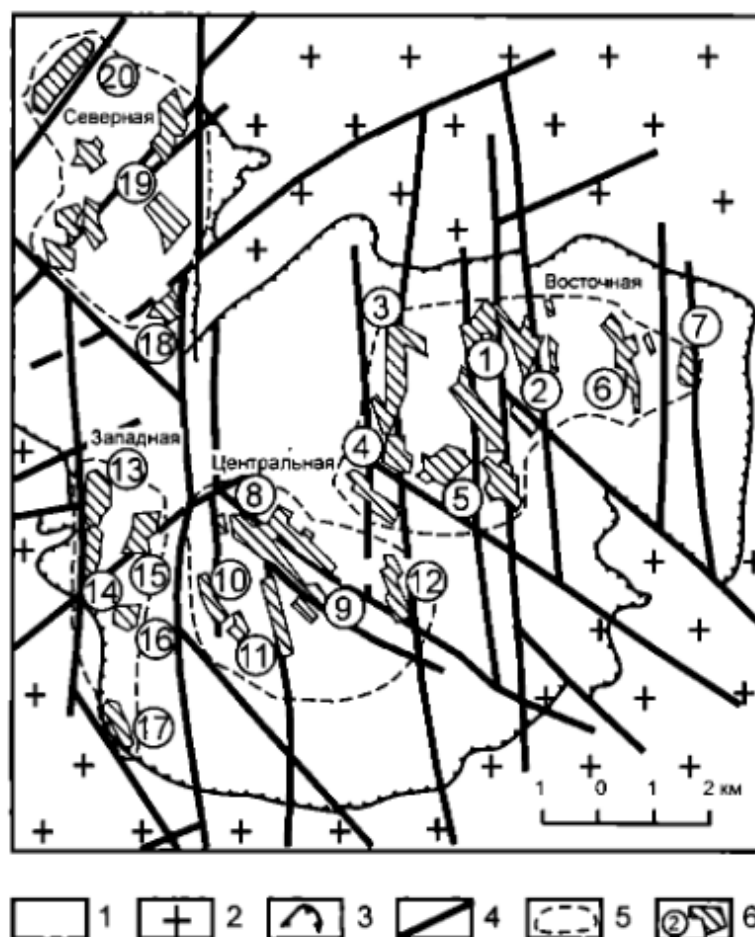
Рисунок 15 – Обзорная карта Стрельцовского (Приаргунского) урановорудного района

Район характеризуется низкогорным степным ландшафтом и находится в области слияния р. Аргунь и ее притока р. Урулюнгуй. Он располагается в Забайкальском крае, в 390 км от г. Читы, с которым связан железной и шоссейной дорогами (рисунок 15). Основной населенный пункт района – г. Краснокаменск, насчитывающий 50 тыс. жителей и являющийся главным промышленным центром, где находятся крупная теплоэлектростанция, обогатительный, сернокислотный, цементный и ремонтно-механический заводы.

2.2.2. Геологическое строение

В геологическом строении района принимают участие образования двух структурных этажей: нижнего, сложенного магматическими и метаморфическими комплексами протерозойско-палеозойского складчатого основания, и верхнего, сформированного мезозойскими вулканогенно-осадочными формациями [25]. Проявления урановой минерализации располагаются в различных структурных обстановках, однако все промышленные месторождения района сосредоточены в Стрельцовой вулкано-тектонической структуре. Стрельцовская структура представляет собой древнюю вулканическую кальдеру обрушения диаметром порядка 12-13 км, ограниченную системой кольцевых сбросов с амплитудами вертикальных смещений от 50 до 700 м (рисунок 16).

Гранит-метаморфическое основание кальдеры сложено высокоглиноземистыми сланцами и доломитами, амфиболитами и меланократовыми гнейсами, а также рифейско-палеозойским комплексом гранитоидов, включающим гранито-гнейсы, гранодиориты, диориты, плагиограниты, лейкограниты [25]. В гранитно-метаморфическом комплексе основания кальдеры проявлены разновременные высокотемпературные гидротермально-метасоматические процессы. Наиболее интенсивно они развиты в пределах Аргунской зоны разломов, которая имеет ширину 1,0-1,5 км, протягивается через всю кальдеру в северо-восточном направлении и контролирует положение большинства урановых месторождений района (см. рисунок 16). В радиогеохимическом отношении метаморфические комплексы кристаллического фундамента обладают фоновыми концентрациями урана и тория, однако наиболее ранние гнейсовидные граниты отличаются повышенными содержаниями урана - до 9 г/т и тория - до 25 г/т [16].



1 - вулканогенно-осадочные отложения Стрельцовской кальдеры; 2 - граниты, гнейсы, кристаллические сланцы фундамента; 3 - контуры Стрельцовской кальдеры; 4 - разломы; 5 - группы месторождений: Восточная, Центральная, Западная, Северная; 6 - проекции рудных залежей на поверхность и месторождения: Восточная группа: 1 - Стрельцовское, 2 - Антей, 3 - Октябрьское, 4 - Лучистое, 5 - Мартовское, 6 - Широңдукуйское, 7 - Восточно-Широңдукуйское; Центральная группа: 8 - Тулукуевское, 9 - Юбилейное, 10 - Новогоднее, 11 - Весеннее, 12 - Мало-Тулукуевское; Западная группа: 13 - Аргунское, 14 - Жерловое, 15 - Красный Камень, 16 - Пятилетнее, 17 - Юго-Западное; Северная группа: 18 - Безречное, 19 - Дальнее, 20 - Полевое

Рисунок 16 – Схема размещения урановых месторождений в Стрельцовском рудном поле [16]

Гранитно-метаморфический фундамент перекрыт осадочно-вулканогенной толщей, представленной покровами базальтов и кислых вулканических пород – риолитов, фельзитов, игнимбритов, андезит-дацитов, вулканических стекол и туфов. Местами встречаются прослои и пачки осадочных пород – конгломератов, гравелитов, песчаников. Содержания урана и тория в вулканогенных породах возрастают от базальтов к кислым эффузивам, а для однотипных пород закономерно изменяются снизу-вверх по разрезу. В базальтах содержание урана не превышает 1,1-1,7 г/т (10-20 Бк/кг),

а тория 4,4-5,6 г/т [16]. Для всех кислых вулканитов характерно высокое содержание тория при значительных вариациях содержаний урана. Максимальные концентрации урана свойственны вулканическим стеклам и фельзитам - 20,6 г/т (250 Бк/кг). Установлено, что почти весь уран содержится в основной стекловидной массе эффузивных пород, распределён в ней равномерно и, по-видимому, является первичным магматогенным [26].

Общую структуру Стрельцовой кальдеры определяют тектонические нарушения субмеридионального, северо-восточного и северо-западного направлений, а также кольцевые разломы, ограничивающие кальдеру (рисунок 16). Основные субмеридиональные, северо-восточные и северо-западные нарушения (Меридиональный, Урулюнгуевский, Тулукуевский разломы, Аргунская зона и др.) относятся к разломам древнего и глубокого заложения.

Пространственная совокупность тектонических элементов кальдеры определяет чрезвычайную сложность структурных систем, служивших каналами движения рудообразующих растворов в Стрельцовском рудном поле, и необычайное разнообразие структурных условий локализации и морфологии рудных скоплений. Большинство месторождений района располагаются в вулканогенных образованиях верхнего структурного этажа. Месторождения Антей и Аргунское, с которыми связана четверть урановых запасов района, размещаются в породах фундамента. Все месторождения сформировались в единый гидротермальный этап и сходны по минеральному составу и геохимическим особенностям. Большинство месторождений локализованы в пределах субширотно-северо-восточной полосы, соответствующей Аргунской зоне разломов (рисунок 16). Месторождения Аргунское и Жерловое находятся в узле пересечения Аргунской зоны с зоной Меридионального разлома. По вещественному составу руды месторождений Стрельцовой кальдеры относятся к молибден-урановой формации. Основной рудный минерал - настуран, менее распространён коффинит. В

незначительном количестве на глубоких горизонтах присутствуют браннерит и уранинит [16].

2.2.3. Радиоэкологическая обстановка

Приаргунское производственное горно-химическое объединение (ПАО «ППГХО»), находящееся в г. Краснокаменск, ПАО «ППГХО» Местоположение градообразующего предприятия: юго-восточное Забайкалье у отрогов Аргунского хребта. Город Краснокаменск находится на расстоянии ~15 км от основных карьеров и шахт по добыче урана. Подробная характеристика радиоэкологической обстановки на объектах ПАО «ППГХО» дана в работе [27].

Сооружение для хранения радиоактивных отходов (РАО) – огаркохранилище – находится непосредственно на территории предприятия. До огаркохранилища и хвостохранилища твердые отходы доставляют по пульповоду – трубе, по которой они перемещаются в водном потоке. Чтобы радиоактивная вода не попадала в почву, ниже огаркохранилища исходным проектом было предусмотрено оборудование десяти водоперехватывающих скважин, из которых в 2012 году работала только одна. В 4-5 километрах к юго-востоку от промышленной площадки предприятия находится падь Бамбакай, где со времени начала работы урановых рудников складировались отходы переработки руд. Площадь свалки отходов превышает 40 га. На территории свалки отмечается существенно повышенный гамма-фон.

В настоящее время основными источниками техногенного радиоактивного загрязнения окружающей среды являются [28]:

- гидрометаллургический завод,
- огаркохранилище, золоотвал, хвостохранилища и промышленные водоемы;
- временные водотоки из падей Тулукуй и Малый Тулукуй, образованные аварийными сбросами рудничных вод из шахт, обводненный карьер ПГС-2, сбросы сточных вод в систему Умыкейских озер.

Природными источниками радиоактивного загрязнения являются:

– урановые (уран-молибденовые) месторождения Стрельцовского рудного поля;

– уран-молибденовое месторождение на границе водозабора питьевой воды.

В результате многолетней производственной деятельности ППГХО произошло техногенное загрязнение отдельных участков санитарно-защитной зоны (СЗЗ). Удельная активность в почве на территории СЗЗ достигает значений 12 800 и 510 Бк/кг для ^{226}Ra и ^{232}Th соответственно. За пределами СЗЗ повышенные значения ^{226}Ra зафиксированы только в районе озера Ланцово – 430 Бк/кг, которые, впрочем, могут быть обусловлены природным повышенным содержанием урана в горных породах. В фоновом населенном пункте (пос. Соктуй-Милозан) средние значения удельной активности в почве ^{226}Ra и ^{232}Th составляют 88 ± 7 и 109 ± 5 Бк/кг соответственно [28].

В наземной растительности на территории в пределах СЗЗ также наблюдаются повышенные уровни удельной активности ЕРН (до 63, 37 и 11 Бк/кг для ^{226}Ra , ^{210}Pb и ^{210}Po соответственно) [28].

ОА радона в наземных рабочих помещениях на территории СЗЗ варьирует от 20 до $1,1\cdot 10^4$ Бк/м³ [28].

Концентрация активности ЕРН в воде всех водохранилищ превышает УВ, установленные для питьевой воды, но ниже, чем уровни, установленные для технической воды [28].

В городе Краснокаменск и его окрестностях за пределами санитарно-защитной зоны предприятия среднее значение МЭД гамма-фона составляет 0,13-0,16 мкЗв/ч, что не превышает среднероссийских значений. Концентрация РН в почвах и грунтах также не превышает фоновых значений. Удельная активность радия-226 колеблется в пределах (25-45) Бк/кг, тория - 232 – (25-65) Бк/кг, калия-40 – (500-900) Бк/кг.

Выполненное в 2011-2012 годах обследование жилых и общественных помещений г. Краснокаменск на содержание радона в помещениях показало,

что среднегодовые значения эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона находятся, в основном, на уровне среднероссийских значений [29]: Ни в одном из обследованных жилых помещений не обнаружены значения ЭРОА радона, превышающие 200 Бк/м³. Это значение было превышено только в пяти учреждениях (из обследованных 74), расположенных в подвалах домов.

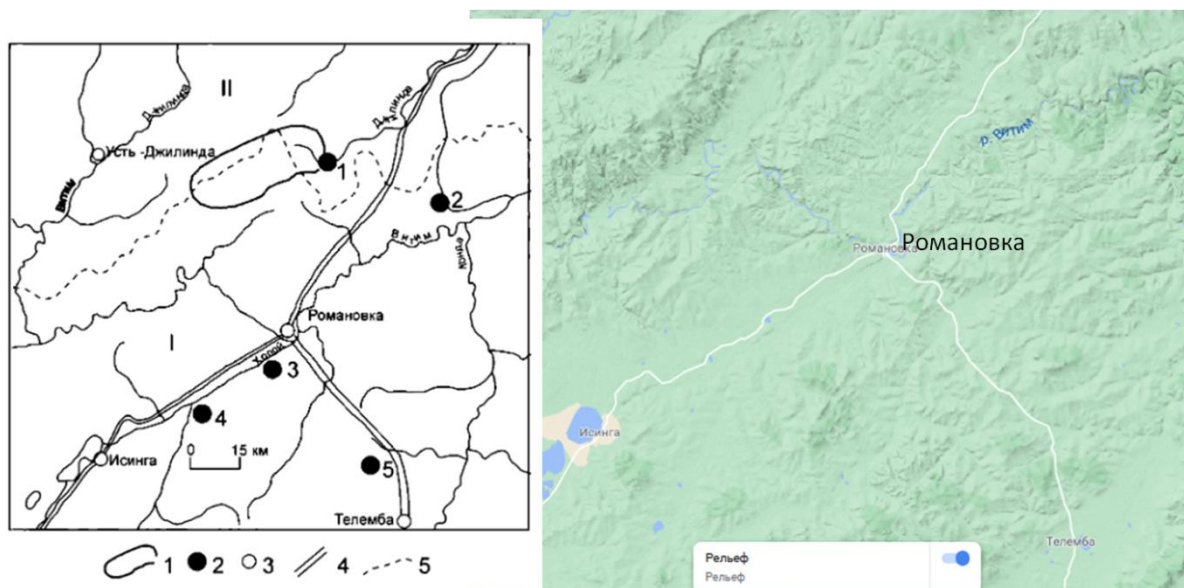
Вместе с тем проблему представляют повышенные концентрации ЕРН уранового ряда в питьевой воде системы водоснабжения города Краснокаменска. Максимальные значения удельной активности урана-238, радия-226 и свинца-210, зафиксированные в воде распределительной водопроводной сети в период с 2009 по 2012 год, составляли 2,3, 0,64 и 0,33 Бк/кг, соответственно [27]. При УВ 3,0 Бк/кг для урана-238, 0,49 Бк/кг для радия-226 и 0,2 Бк/кг для свинца-210. Таким образом, удельные активности урана и радия в воде близки к уровням вмешательства, а максимальная удельная активность свинца-210 превышает УВ для питьевой воды. Удельная активность радона в водопроводной воде составляет от 30 до 80 Бк/кг, т.е. в некоторых случаях также может превышать УВ –60 Бк/кг. Следует отметить, что в г. Краснокаменске выделение радона из воды водопроводной сети может быть значимым источником повышенного содержания радона в воздухе помещений.

2.3. Витимский рудный район

2.3.1. Общая характеристика района

Витимский урановорудный район (Республика Бурятия), площадью 8000 кв.км, располагается в центральной части Забайкалья в 160 км от г. Чита. Район пересекает с юга на север автодорога III класса Чита-Романовка-Багдарин (рисунок 17). В орографическом отношении район расположен в центральной части Витимского плоскогорья, характеризующегося низкогорным таёжным ландшафтом [16].

Климат резко континентальный. Зима на большей части территории малоснежная, незначительный снежный покров и исключительно низкие зимние температуры способствуют распространению и сохранению многолетнемерзлотных горных пород – криолитозонов. Многолетняя мерзлота сплошная, мощность криолитозоны 100 м и более [30]. Зима продолжительная (октябрь-апрель), малоснежная, количество осадков 20-25 мм. Средняя температура декабря- февраля $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, иногда морозы достигают $-50-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Годовая сумма осадков составляет 250-350 мм, большая часть (75%) их выпадает летом. Среднегодовая температура отрицательная ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Глубина протаивания грунтов составляет 0,5-1,2 м.



1 - контур Хиагдинского рудного поля; 2 - месторождения урана: Джилиндинское (1), Родионовское (2), Талакановское (3), Витлаусское (4), Щегловское (5); 3 - населённые пункты; 4 - автодороги; 5 - границы административных районов (I - Еравнинский, II - Баунтовский)

Рисунок 17 – Обзорная карта Витимского рудного района

Экономическая освоенность района слабая, ограниченная золотодобычей, охотой и плохо развитым сельским хозяйством. Рудный район включает следующие урановорудные объекты: рудное поле Хиагдинское с месторождениями Хиагдинское, Вершинное, Неточное и др., и группу пространственно разобщенных месторождений Южно-Витимской площади - Родионовское, Витлаусское, Талаканское, Щегловское (см. рисунок 17).

2.3.2. Общая характеристика АО «Хиагда»

АО «Хиагда» осуществляет промышленную добычу природного урана методом скважинного ПВ на урановорудных месторождениях Хиагдинского рудного поля, расположенных в Баунтовском эвенкийском районе Республики Бурятия. Предприятие находится в экономически неосвоенной и ненаселенной местности. Ближайшие населенные пункты – с. Романовка и с. Усть-Джилинда расположены на расстоянии более 50 км и 68 км соответственно [31].

Наиболее значимыми объектами в зоне деятельности АО «Хиагда» являются: крупное Имское месторождение с запасами, учтенными госбалансом в количестве 23 553 т и прогнозными ресурсами кат. P1 — 64 846 т; Сайжеконтское месторождение с запасами кат. C2 — 4 960 т; Больше-Амалатская площадь с прогнозными ресурсами кат. P3 — 10 000 т [31].

Перспективы расширения сырьевой базы урана в районе далеко не исчерпаны. В ближайшее время планируется выполнить поисковые работы на Антасейской площади (Северо-Восточный РУ) и Аталангинском участке (Западный РУ). Таким образом, Витимский урановорудный район — крупнейший УРР России. Запасы по кат. C1+C2 составляют 54 090 т, прогнозные ресурсы оцениваются в 275 тыс. т.

Экологическая политика АО «Хиагда» разработана в соответствии с Единой отраслевой Экологической политикой Госкорпорации «Росатом» и её организаций и утверждена на предприятии 11 февраля 2009 года.

В 2013 году на предприятии было начато внедрение интегрированной системы менеджмента, которая включает в себя экологический менеджмент и менеджмент качества. Эта система, известная как ИСМ, была введена с целью улучшения управления экологическими и качественными аспектами деятельности предприятия.

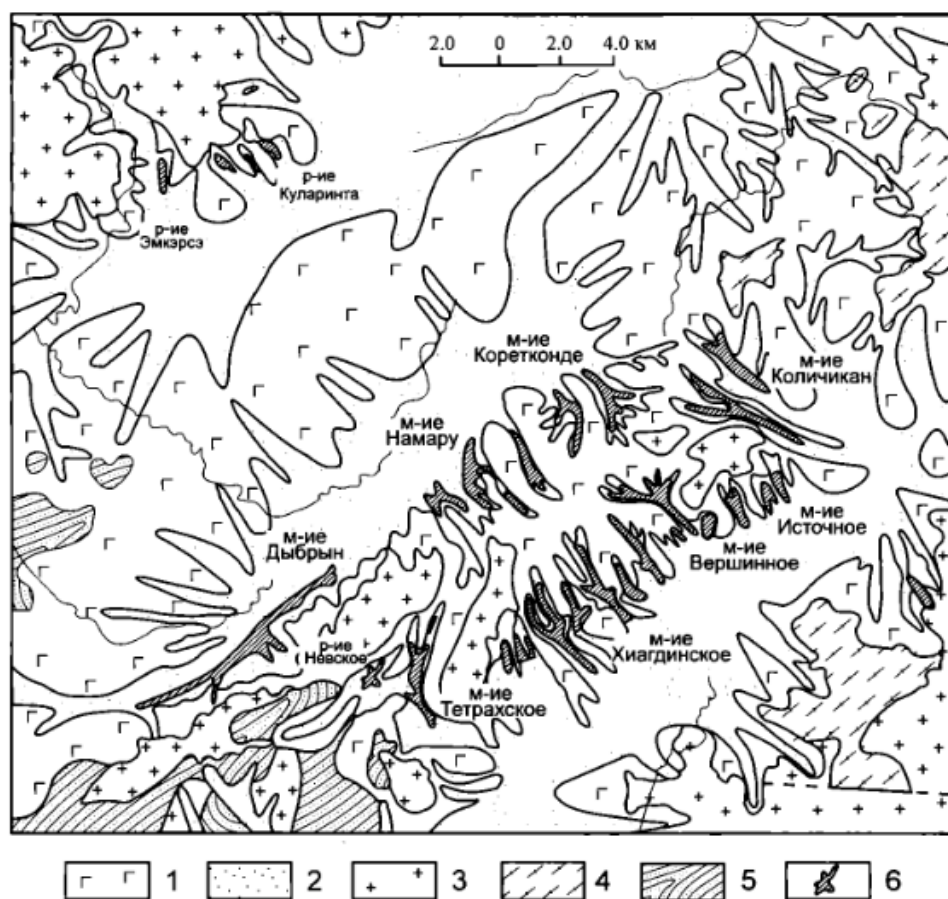
Планировалось в 2022 году внедрить стандарт ГОСТ Р ИСО 19443-2020, который содержит специальные требования по применению ИСО 9001:2015 организациями цепи поставок ядерного энергетического

сектора. Данный стандарт применим к предприятиям, поставляющим продукцию и услуги, существенные для обеспечения ядерной безопасности (ИТАНС). Введение указанного стандарта направлено на повышение уровня качества и безопасности в ядерной энергетике.

Предприятие классифицируется как радиационный объект III категории с учетом потенциальной опасности. Вокруг таких радиационных объектов устанавливается санитарно-защитная зона, ограниченная территорией самого объекта [31]. В данном случае, установление зоны наблюдения не предусмотрено в соответствии с документами ОСПОРБ 99/2010 и СП 2.6.1.2216-07. В случае возникновения аварийных ситуаций на радиационных объектах III категории, радиационное воздействие ограничивается территорией санитарно-защитной зоны.

2.3.3. Геологическое строение

В геологическом строении района важнейшим является неоген-четвертичный комплекс пород, отвечающий новейшей стадии тектоно-магматической активизации, в рамках которой сформировалась Байкальская рифтовая система. С ней связано образование Амалатского плато базальтоидов – важнейшей структуры района, бронирующей эрозионные и эрозионно-тектонические, в том числе, рудовмещающие впадины. Хиагдинское рудное поле расположено на южном фланге Амалатского плато базальтов, в центральной части Торма-Хиагдинской урановорудной зоны. Рудное поле включает в себя 8 урановых месторождений (Хиагдинское, Вершинное, Источное, Намару-Коретконде, Количикан, Тетрахское, Дыбын, Джилиндинское), относящихся к «песчаниковому в палеодолинах» промышленному типу (рисунок 18).



1 - покровные четвертичные базальты; 2 - осадочные породы, выполняющие палеоврезы в палеозойском фундаменте; 3-5 - породы фундамента: 3 - граниты, 4 - гнейсы, 5 - песчаники, известняки; 6 - проекция на дневную поверхность урановорудных залежей

Рисунок 18 – Хиагдинское рудное поле. Геолого-структурный план [16]

Ураноносными здесь являются короткие, длиной от 4 до 16 км, боковые притоки Большеамалатской и Аталангинской палеорек, врезанные в склоны водораздельного Байсыханского поднятия, сложенного гранитоидами палеозойского возраста. Палеодолины выполнены миоценовыми отложениями, погребёнными под мощным покровом платобазальтов. Оруденение локализуется преимущественно в базальных слоях сероцветных осадков на контакте с осветлёнными породами. В пределах зоны, под миоценовым покровом базальтов площадью 4 тыс. кв. км, вскрывается крупная кайнозойская палеоречная система Большого Амалата с основным стоком в северо-восточном направлении. Она состоит из двух ветвей - северной (Палео-Большой Амалат) и южной (Палео-Джилинда), которые

сливаются вблизи восточного замыкания Больше-Амалатской нижнемеловой впадины [16].

Палеодолины врезаны в существенно гранитоидный кристаллический фундамент и выполнены сероцветными осадочными породами. На отдельных участках Хиагдинского рудного поля размещаются палеовулканы, в том числе в пределах выше рассмотренных эрозионно-тектонических приразломных структур. Одним из наиболее крупных и детально изученных бурением является палеовулкан «Вершинный», с диаметром депрессионной воронки порядка 450 м. Структура выполнена стратифицированной туфогенно-осадочной толщей, тектонически просевшей в гранитное основание на глубину порядка 800-900 м [16].

Осадочно-вулканогенный комплекс осложнен дайками долеритов и множеством разноориентированных тектонических нарушений. Формирование вулкано-тектонических структур обусловлено неоднократным проявлением в неогене эруптивной вулканической деятельности, сопровождавшейся циклическими выбросами пирокластического материала, принявшего участие в осадконакоплении. На площади рудного поля отмечены проявления газообразных углеводородов. Урановые объекты принадлежат к геолого-промышленному типу в «базальных» палеодолинах, связанному с проявлением грунтово-пластового окисления. Урановое оруденение контролируется эпигенетической окислительной зональностью грунтово-пластового типа, преобразованной более поздними наложенными глеево-восстановительными процессами с осветлением (обелением) окисленных пород. Окислительная зональность представлена тремя зонами: неизмененных сероцветных безрудных пород, сероцветных рудных и осветленных (белесых), маркирующих былую зону лимонитизации [16].

Урановая минерализация тяготеет пространственно к глинистым минералам, переотложенной органике, сульфидам железа, заполняет поры и трещины в обломках породообразующих минералов. Основными урановыми минералами являются кальциевые фосфаты четырехвалентного урана

(нингионит), очень редки оксиды урана (уранинит, настуран, урановые черни), а также гидроксиды, силикаты, арсенаты, карбонаты, фосфаты шестивалентного урана. Время начала формирования руд, рассчитанное по изотопам свинца и радиоактивных элементов составляет ориентировочно 20 млн лет, самое позднее зафиксированное перераспределение урана завершилось 1–2 млн лет назад. То есть, это относительно «молодые» руды. Главной особенностью руд данного типа является их неравновесность, что связано с молодым возрастом руд, не достигших радиоактивного равновесия между ураном и радием. В результате различной миграционной способности радия и урана разделяются в пространстве, формируя сложные существенно радиевые, либо урановые ореолы [32].

2.3.4. Радиоэкологическая обстановка

Амалатское плато базальтов характеризуются низким радиационным фоном в связи с низкими концентрациями РН в базальтах. Так значения МЭД гамма-излучения на поверхности плато составляют 7-14 мкР/ч, концентрации ЕРН в почвах на базальтах равны U – 1,5-1,7 г/т; Th – 3,0-7,5 г/т; K-40 – 1,0-2,4%. Содержание урана в водах равно 0,14-0,40 мкг/л [30]. За пределами базальтовых лавовых полей повышенные концентрации РН характерны для выходов массивов мезозойских щелочных гранитов и сиенитов (куналейский комплекс). Радиационный фон на таких участках повышен (30-50 мкР/час). С одним из таких массивов – Ингурским интрузивом щелочных гранитов, связано тантало-ниобиевое рудопроявление с высоким содержанием редких земель и Родионовское месторождение урана гидрогенного типа в неогеновых отложениях. Вокруг этого массива щелочных гранитов вдоль разломов сосредоточены выходы углекислых радоновых вод. Ландшафты Романовского холодного минерального источника отличаются аномалиями углекислого газа, радона и редких элементов. Кроме того, на Талаканском месторождении некоторые урановые залежи обнажаются на дневной поверхности и отражаются контрастными аномалиями U и других элементов. Аномально высокие ($326,0-18,6 \cdot 10^{-4} \%$) концентрации урана и элементов-

спутников в травянистых растениях отражают выходы богатых урановых руд на уступе террасы на фоне низких фоновых концентраций.

Техногенное воздействие на экосистемы началось с 1980 г., когда усилились поисково-разведочные работы в связи с открытием Хиагдинского месторождения урана в 1978 г. и с 1989 г. его опытно-промышленной разработкой. Основное воздействие на экосистемы и геологическую среду оказал промышленно-опытный участок с полигоном ПВ урана – локального источника техногенного радионуклидного загрязнения окружающей среды.

Основными источниками техногенного загрязнения являются:

- утечки из оголовков закачных и откачных скважин;
- утечки растворов при разрывах трубопроводов;
- наледи вокруг скважин;
- пруд-накопитель для сбора вод из скважин, дождевых и талых вод, дренирующих полигон;
- выбросы в атмосферу радона, образующиеся при получении уранового концентрата в ГОКе;

Основной вид загрязнения подземных вод продуктивного горизонта при ПВ – развитие сульфатного потока. Природные воды отличаются низким содержанием урана - от 0,02 до 0,41 мкг/л (среднее 0,08 мкг/л). На полигоне ПВ по руч. Дренажный выделяется гидрохимический поток урана (0,15 - 0,4 мкг/л). При опытно-промышленной разработке Хиагдинского уранового месторождения на полигоне ПВ в течение 10 лет поступают стоки промышленного раствора в руч. Дренажный, где сформировался комплексный техногенный гидро-, лито– и биогеохимический поток рассеяния длиной около 1000 м [30, 33]. Примечательно, что геохимический спектр лито- и биогеохимического потока аналогичен составу промышленного раствора, из которого в поток, совместно с ураном и торием, поступают скандий, лантаноиды, церий. Участки аварийных выбросов промышленных кислых растворов характеризуются существенно

повышенными концентрациями урана и радия в водах ручья, донных отложениях, почвах и растительности [30].

На полигоне ПВ вокруг скважин № 17, 20 и др., а также котлована-отстойника выделяются локальные техногенные пятна загрязнения с содержанием урана 7-25 г/т, максимально до 60 г/т (при фоновых значениях 1-2 г/т). Размеры аномальных участков не превышают 70x70 м. МЭД гамма-излучения на таких участках повышается до 25 мкР/ч, а на оголовке скважин до 30-100 мкР/час (фоновые значения 7-14 мкР/час).

Плотность потока радона (ППР) с поверхности грунта на участках месторождения Хиагдинское в основном колеблется от 15 до 50 мБк/м²с, в отдельных точках локально повышаясь до 80-90 мБк/м²с [30]. Низкие значения потока радона связаны с бронированием поверхности слоем покровом базальтовых лав, содержащих низкие концентрации радия. Локальные повышенные значения объясняются наличием повышенных концентраций урана и радия в почвах, что может быть связано как с природными приповерхностными ореолами рассеяния урана и радия, связанными с зонами разломов, так и с утечками рабочего раствора, обогащенного радием с промышленной площадки [30]. Вместе с тем, на месторождениях, лишенных бронирующего базальтового покрова, где щелочные гранитоиды или урановые руды непосредственно выходят на дневную поверхность, как например, на месторождениях Родионовское и Талаканское, следует ожидать гораздо более высоких значения плотности потока радона.

Результаты индивидуального дозиметрического контроля были получены для 323 сотрудников, включая персонал группы А и группы Б. Согласно данным за 2021 год, среднегодовая эффективная доза персонала группы А составила 0,98 мЗв/год, что ниже предела доз для персонала (20 мЗв/год). В то же время, для персонала группы Б среднегодовая эффективная доза составила 0,76 мЗв/год, что также находится ниже установленной нормы (5 мЗв/год).

На исследованной территории (рисунок 19), включая контуры рудных залежей, промплощадки, границу СЗЗ, а также точки отбора водных проб, содержание ЕРН урана-238 и тория-232 находится на уровне фоновых значений, которые характерны для данной территории. Удельные активности урана-238 в почве и донных отложениях составляют от 20,1 Бк/кг до 167,5 Бк/кг, а для тория-232 - от менее 10 Бк/кг до 18 Бк/кг.

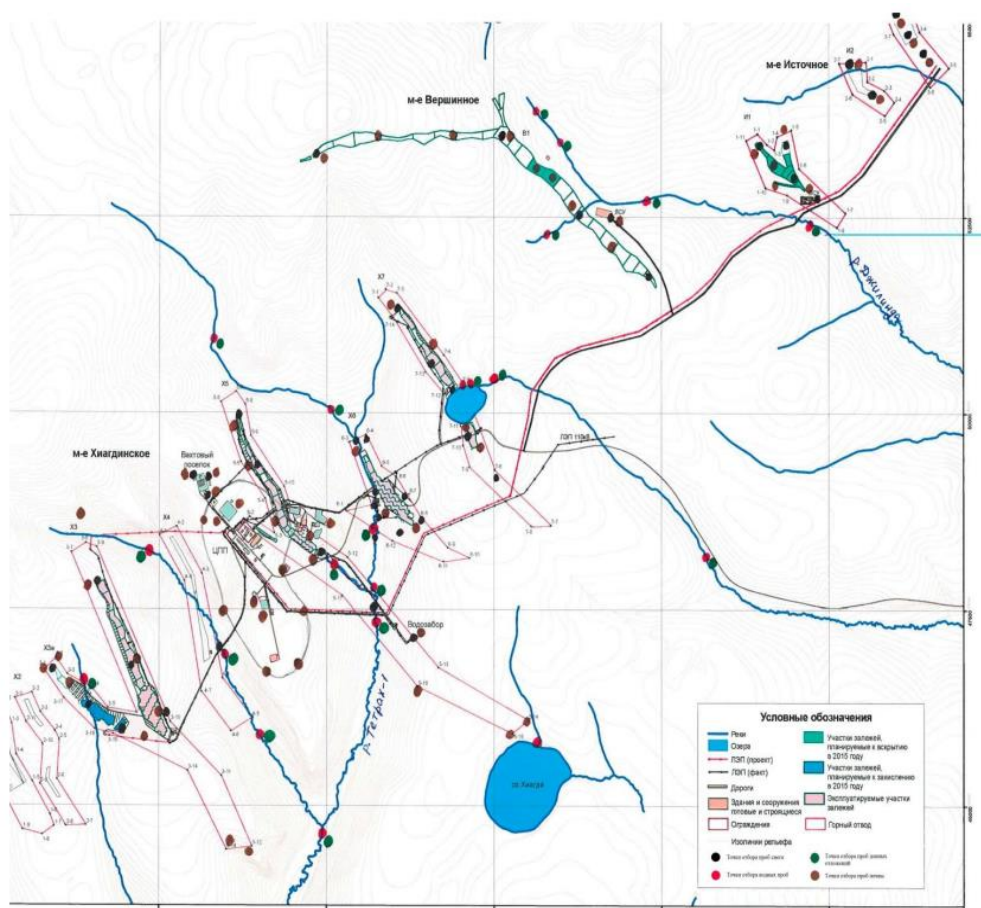


Рисунок 19 – Схема расположения точек проведения мониторинга состояния окружающей среды

Содержание урана-238 в водотоках за пределами влияния работ (в створах 500 м ниже по течению зоны потенциального воздействия) составило менее 0,002 мг/л (0,02 Бк/л). Это значительно выше фонового содержания, которое составляет 0,00002 мг/л за пределами работ. Вместе с тем, уровень содержания урана-238 не превышает уровень вмешательства для питьевой воды (3 Бк/л) и предельно допустимые концентрации урана в воде, которое составляет 0,015 мг/л. Учитывая проведённые измерения за 2015-2021 годы

исследований состава атмосферных осадков (снег) и почвенного покрова приводится в таблицах 8 и 9.

Таблица 8 – Состав атмосферных осадков (снег)

Год		pH	Сухой остаток	Сульфаты	U мг/л	Th мг/л	²³⁸ U Бк/кг	²²⁶ Ra Бк/кг	²¹⁰ Po Бк/кг	²³² Th Бк/кг	²¹⁰ Pb Бк/кг
2015	Min	3,4	6,9	2,3	<0,001	<0,001	-	-	-	-	-
	Max	9,1	31316	30712	0,4	0,016	-	-	-	-	-
2016	Min	6,9	-	-	0,0001	0,000010	0,005	0,02	0,034	0,02	0,102
	Max	7,8	-	-	0,0001	0,002	0,009	0,062	0,053	0,02	0,171
2017	Min	5,5	26	<10	<0,002	<0,0002	<0,01	<0,05	<0,02	<0,05	0,02
	Max	7,9	1059	845	0,018	0,013	<0,01	<0,05	0,041	<0,05	0,05
2018	Min	6,36	219	3,23	<0,002	<0,0002	0,008	<0,02	0,126	≤0,02	0,046
	Max	9,02	449	46,3	0,018	0,013	0,019	0,061	0,170	0,026	0,282
2019	Min	6,36	219	3,23	<0,002	<0,0002	0,008	<0,02	0,126	≤0,02	0,046
	Max	9,02	449	46,3	0,018	0,013	0,019	0,061	0,170	0,026	0,282
2020	Min	6,96	149	14,0	2,1	<2,5	0,008	<0,02	0,070	<0,02	0,131
	Max	8,05	442	30,0	5,2	<2,5	0,014	<0,02	0,278	<0,02	0,166
2021	Min	7,0	140	20,70	2,1	<2,5	0,008	<0,02	0,070	<0,02	0,131
	Max	7,8	204	48,70	5,2	<2,5	0,014	<0,02	0,278	<0,02	0,166

Как следует из таблицы удельная активность радионуклидов находится в пределах УВ.

Таблица 9 – Результаты исследования почвенного покрова

Год		pH	SO4	U мг/кг	Th мг/кг	²³⁸ U Бк/кг	²²⁶ Ra Бк/кг	²¹⁰ Po Бк/кг	²³² Th Бк/кг	²¹⁰ Pb Бк/кг
2015	Min	3,5	11,5	2	2	10	-	-	10	-
	Max	7,8	720	29,2	18,7	359	-	-	80	-
2016	Min	5,1	-	1,2	3,9	8	21	18	10	26
	Max	6,7	-	2,6	9,1	36	37	80	44	91
2017	Min	3,6	12,6	2	2	24	19	22	10	21
	Max	7,8	659	26,7	23	225	36	38	51	47
2018	Min	6,04	<20	2	<2,5	4	20	20	4,8	21
	Max	7,45	<20	12,1	3,9	172,2	39	42	18	45
2019	Min	6,04	<20	2	<2,5	4	20	20	4,8	21
	Max	7,45	<20	12,1	3,9	172,2	39	42	18	45
2020	Min	5,88	26,3	1,8	<2,5	4	20	20	4,8	21
	Max	8,38	76,7	11,4	3,9	29	39	42	8,2	45
2021	Min	5,1	2,36	1,8	<2,5	4	20	20	4,8	21
	Max	5,9	26,1	11,4	3,9	29	39	42	8,2	45

Обобщенные результаты исследований донных отложений за 2016-2021 гг. представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты исследования донных отложений

	2016 г.		2017 г.		2018 г.		2019 г.		2020 г.		2021	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
pH, ед.	-	-	4,4	8,6	6,47	7,62	6,47	7,72	6,47	7,72	5,9	6,9
Сульфаты	-	-	157	821	<20	<20	<20	<20	22,8	48,8	<0,5	0,8
S	0,1	50·10 ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cd	0,037	2,6	0,03	1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,19	0,37	2,25	3,64
Cu	3,3	70,9	10,6	55,3	8,8	13,0	8,8	13,0	10,5	22,5	5,8	8,0
Co	2,5	38,1	7,3	31,2	1,83	6,3	1,83	6,3	2,3	5,9	1,2	1,67
Zn	9,3	164	26,9	107	17,5	38,0	17,5	38,0	21,2	28,7	10,5	17,1
Oil	12,8	254	23	569	145	275	148	276	<50	58	100	190
As	0,9	11,2	0,6	4,7	0,43	1,67	0,43	1,68	0,12	0,99	<0,1	<0,1

Hg	0,03	7,1	0,029	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Pb	4,8	26,1	1,2	14,2	7,7	12,8	7,7	12,8	<0,1	3,3	5,0	6,8
U	10	219,8	2,5	33,6	2,3	5,1	2,3	5,1	2,1	5,2	2,1	5,2
Th	2,5	19	2,5	4,4	2,5	2,6	<2,5	2,6	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5

Динамика объёмов выбросов РН в атмосферный воздух представлена в Таблице 11:

Таблица 11 – Динамика объёмов выбросов радионуклидов в атмосферный воздух

ПДУ, Бк/год	2016	2017	2018	2019	2020	2021
8,34E+13	1,48+08 Бк	4,43E+08 Бк	4,44E+08 Бк	4,44E+08 Бк	11,14E+10 Бк	10,11E+10 Бк

Фактические выбросы РН в атмосферный воздух в 2021 году составили 25% от нормативно допустимых.

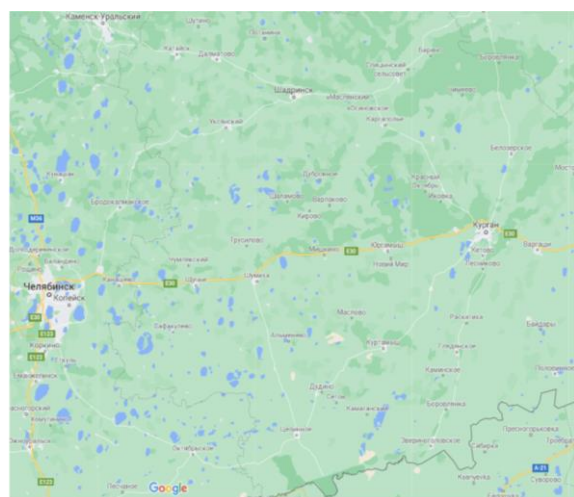
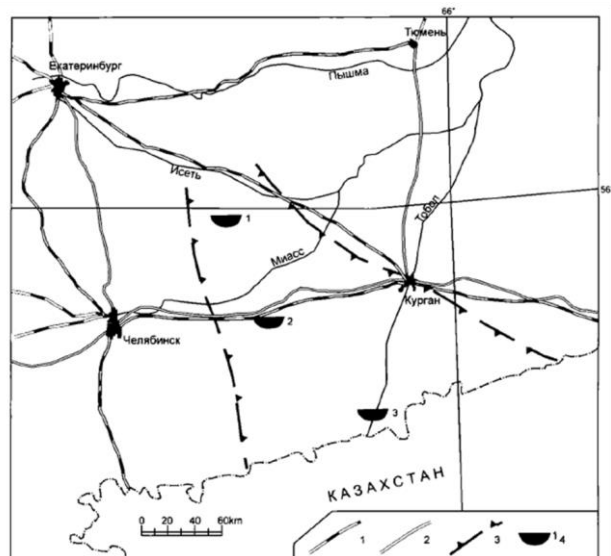
При образовании потенциальных РАО на предприятии предусматривается проведение измерений уровней радиоактивного загрязнения таких отходов. По результатам проведённых в 2021 году измерений, отходов, которые соответствовали бы категориям РАО не зафиксировано.

2.4. Зауральский рудный район

2.4.1. Общая характеристика района

В административном отношении район относится к Курганской области. Он хорошо освоен, его территория пересекается железнодорожными магистралями Свердловск-Курган-Петропавловск и Челябинск-Курган, а также густой сетью автодорог районного и государственного значения (рисунок 20). Через район проходят трассы магистральных нефтепроводов. Развиты химическая и нефтехимическая промышленность, машиностроение и металлообработка, пищевая промышленность, электроэнергетика, сельское хозяйство. Климат - резко континентальный; средняя температура января - 18 °С, средняя температура июля +19°С. Значительное удаление территории области от морей, присутствие Уральских гор на западе, с юга прямое соседство с обширными степными районами, а также рельеф местности и

особенности циркуляции воздушных масс определяют континентальный характер климата (холодная малоснежная зима и теплое сухое лето). Для весны характерны частые возвраты холодов. Недостаток влаги летом, периодически повторяющиеся засухи. Все это делает территорию лесостепного Зауралья зоной, рискованной для земледелия. Средняя годовая сумма осадков изменяется в пределах от 320 мм до 470 мм. Количество осадков уменьшается с северо-запада на юго-восток. Летние осадки значительно преобладают над зимними, максимум приходится на июль и достигает на западе 70-80 мм, на юго-востоке 50-60 мм.



1 - железнодорожные магистрали; 2 - автодороги с асфальтовым покрытием; 3 - границы Зауральского урановорудного района; 4 - урановые месторождения палеодолинного типа: 1 - Далматовское, 2 - Хохловское, 3 - Добровольное.

Рисунок 20 – Обзорная карта Зауральского рудного района [16]

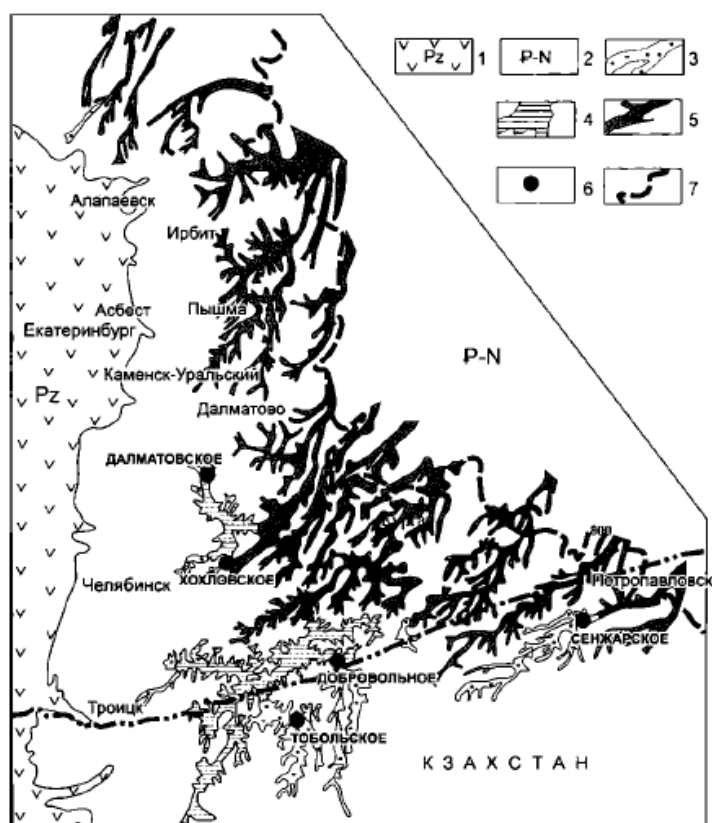
2.4.2. Геологическое строение

Ураноносность территории Зауралья определяется, главным образом, месторождениями и проявлениями урана в верхнеюрских-нижнемеловых палеорулах, врезанных в кристаллические породы доюрского фундамента. Промышленное значение здесь имеет осваиваемый в настоящее время Миасско-Тобольский рудный район, который включает три месторождения - Далматовское, Хохловское, Добровольное и большую группу рудопроявлений [16].

В тектоническом отношении район располагается в пределах Зауральского поднятия и Тюмено-Кустанайского прогиба (рисунок 21). Складчатый фундамент залегает на глубинах от 50 м на западе и до 700 м на востоке района. Он сложен преимущественно породами силура, девона и карбона, распространенными в пределах Зауральского поднятия. Тюмено-Кустанайский прогиб слагают карбоновые отложения. Они представлены туфами основного состава, туфопесчаниками, песчаниками, известняками, глинистыми сланцами с прослоями конгломератов и гравелитов. Палеозойские образования сложно дислоцированы, интенсивно литифицированы и в пределах Зауральского поднятия прорваны гранитоидными интрузиями позднего палеозоя [16].

На породах палеозоя с угловым несогласием залегают отложения нижнего-среднего триаса - базальты, риолиты и красноцветные обломочные породы, которые накапливались в прогибах и впадинах. Мощность их 500 м и более. Породы сильно дислоцированы, литифицированы и образуют самостоятельную вулканогенно-терригенную формацию.

Поверхность фундамента осложнена палеодолинами протяженностью в десятки км, шириной 2-5 км и глубиной вреза до 150 м. Они выполнены отложениями поздней юры и раннего мела. Их разрез в нижней и средней частях представлен сероцветными аллювиальными осадками, а венчается существенно глинистой красноцветной пачкой, которая с нижележащими сероцветными речными отложениями обычно связана постепенными переходами. Пачка красноцветных пород, по-видимому, относится к раннему мелу. В краевых частях палеодолин эта пачка ложится непосредственно на фундамент. Вышележащие осадки датируются аптом-сеноманом. Они сложены аллювиальными песчаниками и глинами, выполняющими раннемеловые палеодолины. Ширина речных долин раннемелового возраста достигает 10 км, а глубина вреза не превышает 30- 50 м. Большая их часть располагается над юрскими долинами. Иногда на западе района они врезаются в складчатый фундамент, но глубоких врезов не образуют.



1 - породы складчатого основания; 2 - породы осадочного чехла Западно-Сибирской платформы; 3-5 - позднеюрские долины, выполненные: 3 - окисленными породами, 4 - неокисленными породами, 5 - неустановленного типа; 6 - урановые месторождения; 7 - изолиния глубины залегания фундамента 800 м

Рисунок 21 – Схема геологического строения Зауральского рудного района [16]

На основе палеотектонической, палеоклиматической, палеогидрогеологической реконструкций, с учётом формационного анализа, для района Среднего Зауралья выделены две рудообразующие эпохи, благоприятные для формирования инфильтрационного уранового оруденения: позднеюрско-раннемеловая и позднеолигоцен-миоценовая. Наиболее продуктивна позднеюрско-меловая эпоха, с которой связано образование гидрогенных месторождений урана палеодолинного промышленного типа - Далматовского, Хохловского, Добровольного [16]. Она характеризовалась колебательными тектоническими движениями небольшой амплитуды, сменой гумидного климата аридным, размывом кор выветривания и инфильтрационным гидродинамическим режимом в отложениях палеорусел.

Месторождения представляют собой протяженные (до 10 км) лентообразные зоны ураноносных пород в палеодолинах, контролируемые сложнопостроенной областью выклинивания древнего (мезозойского) грунтово-пластового окисления. В пострудный период, когда инфильтрационный режим сменился эксфильтрационным (элизионным), окислительная зональность претерпела воздействие глеево-восстановительных процессов с преобразованием лимонитизированных пород в белесые (обеленные или осветленные) разности. В настоящее время реликты эпигенетически лимонитизированных пород устанавливаются на контактах с глинисто-алевролитовыми малопроницаемыми компонентами русловых отложений. На всех месторождениях урановые руды залегают на больших глубинах, приповерхностные горные породы и почвы характеризуются невысокими значениями содержания РН. Глубина залегания руд составляет 400-480 м на Далматовском месторождении, 380-450 м на Хохловском и 480-690 м на Добровольном месторождении.

Суммарные запасы урана в районе оцениваются в 34 тыс. т [16].

2.4.3. Радиоэкологическая обстановка

Радиационную ситуацию в Курганской области в целом можно охарактеризовать как удовлетворительную и стабильную. Несмотря на то, что радиационная обстановка в области определяется радиоактивным загрязнением вследствие деятельности ПО «Маяк», радиационный фактор не является ведущим фактором вредного воздействия на здоровье населения области. Усредненная на одного жителя Курганской области среднегодовая эффективная доза от всех видов излучения по данным радиационно-гигиенического паспорта за 2017 год составила 3,8 мЗв/чел., в предыдущие годы колебалась от 2,9 мЗв/чел в 2016 году до 3,5 мЗв/чел. в 2014 году. Анализ форм ДОЗ № 1,2,3,4 и данных радиационно-гигиенического паспорта Курганской области показали, что структура коллективной дозы облучения населения области аналогична структуре предыдущих лет [34]. Растекание техногенных растворов на полигонах ПВ в период эксплуатации

месторождений оценивалось методами натурального контроля за распространением техногенных растворов по 155 наблюдательным скважинам. Среднее содержание ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U в надрудных водоносных горизонтах не превышает УВ для питьевой воды, утвержденные в НРБ-99/2009. Среднее содержание химических соединений NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} в надрудных водоносных горизонтах не превышают гигиенические нормативы, утвержденные в СанПиН 2.1.4.1074-01. Проведенный комплекс лабораторных исследований подземных вод наблюдательных скважин и вод поверхностных водоемов позволяет сделать вывод, что концентрации определяемых радионуклидов и химических элементов в надрудных водоносных горизонтах не превышают среднефоновых уровней для региона Челябинской и Курганской области [34; 35]. Результаты определения удельной активности РН в атмосферном воздухе, почвах, донных отложениях и растительности на территории месторождений Далматовского и Хохловского показывают, что содержание ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U в данных средах находятся на фоновом уровне [34,35].

Обобщённые результаты радиационного мониторинга в Зауральском рудном районе по данным [35] приведены в таблицах 12-17.

Таблица 12 – Результаты мониторинга объемной активности радионуклидов в пробах атмосферного воздуха в 2020 году [35]

№ п/п	Месторождение	Объемная активность, Бк/м ³				
		сумм. α	сумм. β	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra
1	Далматовское	$<5 \times 10^{-4}$	$<5 \times 10^{-4}$	$<1 \times 10^{-4}$	$<1 \times 10^{-4}$	$<5 \times 10^{-3}$
2	Хохловское	$<5 \times 10^{-4}$	$<5 \times 10^{-4}$	$<1 \times 10^{-4}$	$<1 \times 10^{-4}$	$<5 \times 10^{-3}$
3	Добровольное	$<5 \times 10^{-4}$	$<5 \times 10^{-4}$	$<1 \times 10^{-4}$	$<1 \times 10^{-4}$	$<5 \times 10^{-3}$
Допустимые значения (НРБ-99/2009)		-	-	4×10^{-2}	$4,9 \times 10^{-3}$	3×10^{-2}

Из таблицы 12 следует, что во всех пробах воздуха ОА исследуемых радионуклидов находится на уровне предыдущих лет, и меньше допустимой ОА для населения (СанПиН 2.6.1.2523-99 (НРБ-99/2009)).

Таблица 13 – Содержание естественных радионуклидов в пробах воды из поверхностных водоемов

№	Месторождение	Объемная активность, Бк/л
---	---------------	---------------------------

п/п		сумм. α	сумм. β	²³⁸ U	²³⁴ U	²³² Th	²²⁶ Ra
1	Далматовское	<0,02 – 0,18	0,16 – 0,81	<0,01 – 0,08	<0,01 – 0,09	<0,05	<0,05
2	Хохловское	<0,02 – 0,08	<0,1 – 0,58	<0,01 – 0,04	<0,01 – 0,05	<0,05	<0,05
3	Добровольное	0,05 – 0,32	<0,1 – 0,65	<0,01 – 0,04	<0,01 – 0,29	<0,05	<0,05
Допустимые значения (НРБ-99/2009)		-	-	3,0	2,8	0,6	0,49

Из данных таблицы 13 следует, что в пробах воды из поверхностных водоемов удельные активности исследуемых РН меньше их уровней вмешательства в питьевой воде, установленных НРБ-99/2009.

Таблица 14 – Содержание естественных радионуклидов в пробах питьевой воды населенных пунктов

№ п/п	Месторождение	Объемная активность, Бк/л					
		сумм. α	сумм. β	²³⁸ U	²³⁴ U	²³² Th	²²⁶ Ra
1	Далматовское	<0,02 – 0,06	0,2 – 0,43	<0,01	<0,01	<0,05	<0,05
2	Хохловское	<0,02 – 0,22	0,22 – 0,42	<0,01	<0,01	<0,05	<0,05
3	Добровольное	<0,02 – 0,04	0,23 – 0,25	<0,01	<0,01	<0,05	<0,05
Допустимые значения (НРБ-99/2009)		0,2	1,0	3,0	2,8	0,6	0,49

Таблица 15 – Содержание радионуклидов в пробах почвы

№ п/п	Месторождение	МАЭД, мкЗв/ч	Объемная активность, Бк/л			
			²³⁴ U	²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra
1	Далматовское	<0,10 - 0,12	11-25 (197*)	6,8-20,7 (190*)	16,9-29	9,9-26
2	Хохловское	<0,10 - 0,12	<5 – 35,5	6 – 35,1	7 – 29	7 – 23
3	Добровольное	0,10 – 0,13	10,4 – 59,0	7,4 – 42,6	17 – 33	14 – 25

Таблица 16 – Содержание радионуклидов в пробах донных отложений

№ п/п	Месторождение	Объемная активность, Бк/л			
		²³⁴ U	²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra
1	Далматовское	6,5 – 35,1	7,8 – 46,1	8,6 – 25	8,6 – 20
2	Хохловское	5,6 – 28,0	<5 – 26,2	3,5 – 32	3,9 – 27
3	Добровольное	<5 – 10,1	<5 – 9,7	7 – 34	7 – 27

Таблица 17 – Содержание радионуклидов в пробах растительности

№ п/п	Месторождение	Объемная активность, Бк/л			
		²³⁴ U	²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra
1	Далматовское	<1,0	<1,0	<2 – 9	<2 – 6,7

2	Хохловское	<1,0	<1,0	<2 – 5	<2 – 10
3	Добровольное	<1 – 2,9	<1 – 1,6	<2 – 3,9	<2 – 4,1

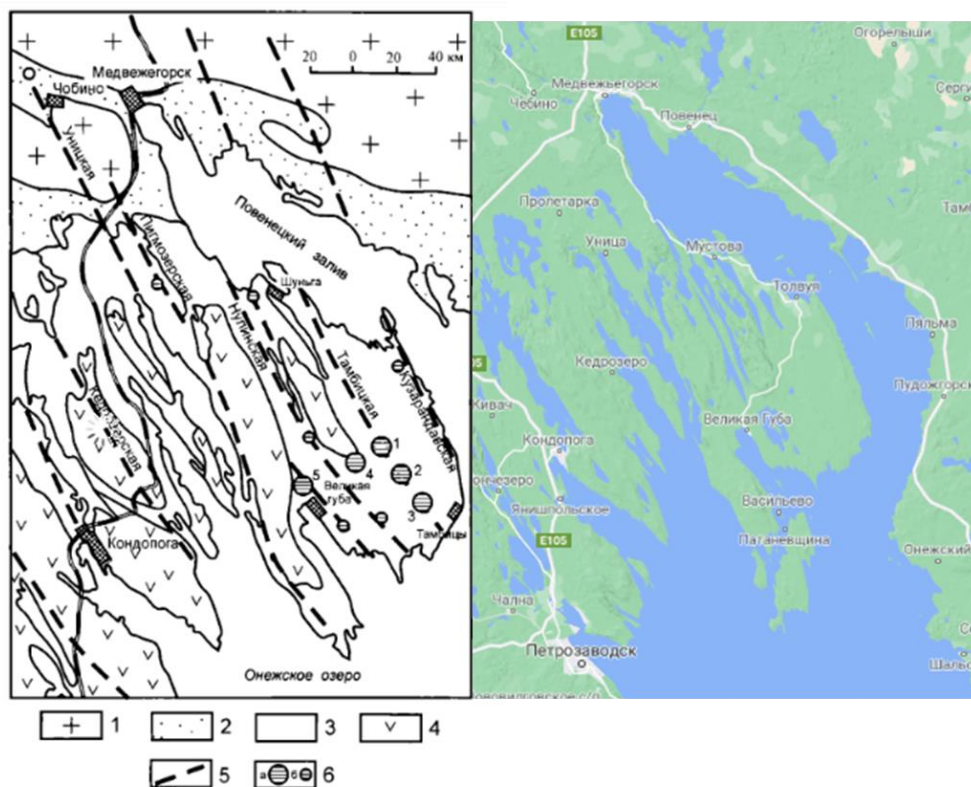
Из данных таблиц 15-17 следует, что удельные активности ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U в донных отложениях, почве и растительности не превышают фоновых значений региона.

Месторождения Зауральского рудного района приурочены к переуглубленным древним долинам юрского времени, расположены значительно глубже современного базиса эрозии и перекрыты мощными водоупорными глинистыми толщами, что практически исключает их значимое влияние на подземные и поверхностные воды, а также почвы и донные отложения [36]. Теоретически в ходе разработки месторождений в случае грубых нарушений технологического процесса возможно локальное загрязнение окружающей среды за счет утечек растворов, содержащих РН уранового ряда из трубопроводов и т.п. Однако, распространяться за пределы промплощадки в сколько-нибудь значимых количествах с инфильтрующимися водами и/или поверхностным стоком могут только изотопы урана. Основные долгоживущие продукты распада урана, включая, торий-230 и радий-226, останутся в пределах промплощадки, т.к. их миграция затруднена. Торий в принципе не образует растворимых соединений, и мигрирует только во взвешенных формах, а радий в условиях месторождения образует с серноокислыми растворами, применяемыми в процессе ПВ, нерастворимый сульфат радия, что также делает его миграцию на большие расстояния невозможной. На данный момент подтвержденных сведений об утечках радиоактивных или серноокислых растворов на месторождениях Зауральского рудного района в ходе производственного процесса нет. Однако, общественные организации представляют сведения о возможных утечках радиоактивных растворов в пределах промплощадки, которые регулярно опровергаются администрацией АО «Далур» [37].

2.5. Месторождение Онежского района

2.5.1. Общая характеристика района

Онежский район расположен в юго-восточной части Республики Карелия, прилегающей к Онежскому озеру. Рельеф северо-западной части района грядово-холмистый с большим количеством заливов и узких озёр, разделённых покрытыми лесом кряжами и грядами высотой до 100 м с прерывистыми небольшими равнинами. Рельеф южной части района равнинный; широко развиты моренные отложения. Район экономически освоен [16], территория пересечена сетью железных и автомобильных дорог государственного, республиканского и местного значения; на западе района расположены города Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск с многочисленными промышленными предприятиями различного профиля (рисунок 22). Расположение территории в относительно высоких северных широтах определяет крайне неравномерное распределение солнечной радиации в течение года. Около 65% солнечного тепла приходится на май–август, а 35% – на осенне–зимние месяцы. Зимой солнце поднимается невысоко, день длится 5–7 часов, а покрытая снегом земля отражает до 85% солнечных лучей. Кроме того, малому количеству поступающей солнечной энергии способствует характерная для северных широт высокая облачность, связанная с частым прохождением циклонов. Летом же условия очень сильно меняются: солнце поднимается над горизонтом высоко, облачность по сравнению с зимой резко уменьшается, день длится 19 часов.



1 - гнейсы и гранитоиды раннего архея; 2 - конгломераты, кварциты нижнего протерозоя; 3 - осадочно-вулканогенные отложения нижнего протерозоя; 4 - углерод-содержащие сланцы и вулканогенные образования заонежской свиты нижнего протерозоя; 5 - зоны складчато-разрывных дислокаций; 6 - уран-ванадиевые месторождения (а): 1 - Средняя Падма, 2 - Верхняя Падма, 3 - Царёвское, 4 - Весеннее, 5 - Космозерское, и 6-рудопроявления

Рисунок 22 – Онежский район. Обзорная геологическая карта [16]

Данное распределение количества солнечной радиации в течение года является главным фактором формирования температурного режима полуострова. Средние годовые температуры воздуха в Заонежье положительны и составляют $2,3^{\circ}\text{C}$. Количество осадков – в среднем 650 мм/год, большая часть их выпадает в тёплое время года, меньшая – в холодное. Снежный покров появляется в конце октября и исчезает около 20-го апреля. Значительное влияние на климат оказывает Онежское озеро, выступающее в качестве мощного обогревающего фактора в период с августа по март. Благодаря чему климат в Заонежье более мягкий, чем в других районах Карелии, даже расположенных южнее.

Большинство озер Заонежского полуострова, а также глубоко вдающихся в него губ и заливов Онежского озера имеют тектоническое происхождение. Это знаменитые Кижские шхеры, заливы и губы Онежского

озера: Уницкая, Великая, Святуха, Кефть-губа и др.; озера: Падмозеро, Путкозеро, Космозеро; системы озер: Турастам – Нижнее и Верхнее Мягрозеро, Карасозеро – Ладмозеро и др.

2.5.2. Геологическое строение

С геологической точки зрения онежский прогиб представляет собой брахиформную синклинорную структуру, сформированную в раннем протерозое (2350-2100 млн. лет) на архейском гранито-гнейсовом фундаменте. Это крупнейшая эпикратонная впадина, отличающаяся от других подобных структур Карельского мегаблока размерами, полнотой и мощностью геологического разреза, широким развитием разрывных структур и своеобразными складчато-разрывными дислокациями, а также особенностями глубинного строения земной коры [16].

В Заонежском блоке района располагаются несколько месторождений комплексных уран-благороднометалльно-ванадиевых руд: Средняя Падма, Царёвское, Космозерское, Весеннее (рисунок 22) и многочисленные более мелкие рудные объекты этого же типа. В Прионежской мульде выявлено месторождение урана Птицефабрика неясного генезиса, локализованное в углеродсодержащих песчаниках, а также ряд проявлений урановой минерализации в альбититах и альбит-карбонатных метасоматитах (рудопроявление Рыбрека и др.) с бедными рудами.

В региональном плане Онежская впадина приурочена к Повенецкому блоку, тяготеющему к узлу пересечения трансрегиональных систем тектонических зон - субмеридиональной Ладожско-Беломорской и северо-восточной ориентировки Балтийско-Мезенской. Границами блока (и впадины) являются долгоживущие разломы с глубиной заложения 50- 60 км: Гирвасский и Хаутаварский на западе, Пудожгорский на востоке. Северной границей является Кумсинско-Повенецкая разломно-грабеновая структура. Южное ограничение впадины скрыто под Онежским озером, под акваторией которого с юго-запада на северо-восток протягивается крупный Бураковский разлом Балтийско-Мезенской трансблоковой зоны. Основание впадины

сложено архейскими гранито-гнейсовыми комплексами амфиболитовой фации метаморфизма. По геофизическим данным, в основании впадины предполагается присутствие гранитоидных массивов, аналогичных позднеархейским гранитоидам, выходящим на поверхность в зоне Кумсинского разлома [16].

Важными особенностями протерозойской толщи, выполняющей впадину, являются красноцветный облик её нижней части и преобладающе сероцветный облик верхних частей, обусловленный присутствием углеродистого вещества – шунгита (до 20-70%); высокая карбонатность (доломиты, реже известняки) верхней части разреза; антидромный характер магматизма: от редких субщелочных метадиабазов до пикритовых порфириров. Общая мощность отложений, выполняющих Онежскую впадину, в западной части достигает 3,5 км, к востоку она сокращается до 2,0-0,8 км, причём на крайнем востоке на поверхность выходят только породы нижней туломозёрской свиты.

В конце раннего протерозоя (1800-1700 млн. лет) в вулканогенно-осадочной толще впадины, на фоне общего пологого залегания её слоёв, возникли диагональные зоны складчато-разрывных дислокаций [38]. К настоящему времени установлено более 10 таких зон. Зоны уверенно картируются методами структурной геофизики, а по данным МОВЗ в гранито-гнейсовом основании впадины им соответствуют разломы корового заложения. Основу зон дислокаций составляют узкие протяжённые (до 100 км и более) антиклинальные структуры шириной 2-4 км, пересекающие впадину в северо-западном направлении и на юго-востоке уходящие под акваторию Онежского озера. Каждая зона состоит из нескольких сжатых крутых линейных антиклинальных складок. Хорошо развитые складки характеризуются значительной амплитудой (сотни метров) при изоклиальной, реже веерообразной форме, с крутым до опрокинутого залеганием пород с проявлением дисгармоничной складчатости высоких порядков. Антиклинальные структуры осложнены разломами в виде

прерывистых согласных со складчатостью и секущих крутых швов, образованных катаклазитами, линзами брекчий и милонитами.

Урановая и ториевая минерализация связаны со скоплениями биотита и пирита в зонах катаклаза и окварцевания и проявлены в виде отдельных вкрапленников либо кучных скоплений уранинита, урано-торианита, торита, монацита, циркона, ортита, апатита, часто в ассоциации с крупночешуйчатым молибденитом. В дальнейшем имели место процессы натрового метасоматоза, которые в кристаллическом основании контролировались зонами милонитизации вдоль Хаутоваро- Гирвасского и Кумсинского разломов. В Онежской впадине натровые, сменяющие их калиевые метасоматиты и жильные урановые образования являются характерной особенностью зон складчато-разрывных дислокаций. Более всего они развиты в сложно построенных участках этих зон [16].

Главные урановые минералы руд – уранинит, настуран и коффинит, второстепенные – реликтовый браннерит в альбититах, некоторые количества урана заключены в полифазных железо-титановых скоплениях с хромом и ванадием. Уранинит и настуран ассоциируют с кальцитом, который заполняет полости и замещает доломит предшествующей стадии. Уранинит представлен кристаллами от десятых долей мм до 1,5 мм, его кристаллы образуют как редкую вкрапленность, так и скопления в кальците, в кварц-доломитовых агрегатах и в крупночешуйчатых слюдах. Радиологический возраст уранинита 1760 ± 30 млн. лет (U-Pb метод). Настуран в виде кайм нарастает на зёрна кальцита, корродирует и замещает уранинит, развивается на реликтах браннерита в альбититах, на пластинчатом гематите, между чешуйками слюд и псевдоцементно в агрегатах доломита. В местах ванадиевой минерализации с настураном ассоциирует монтрозеит. Коффинит в мельчайших колломорфных выделениях нарастает на все ранее образованные минералы и слагает редкие тонкие прожилки с кальцитом и хлоритом. Коффинитовая минерализация развита шире уранинитовой и настурановой и, в отличие от последних, встречается только в слабо

изменённых альбитизированных породах. По данным анализа флюидных включений, температуры образования урановой минерализации составляли 100-150°C [16].

Архейско-протерозойские образования перекрыты прерывистым чехлом четвертичных отложений, представленным, главным образом, ледниковыми и водно-ледниковыми рыхлыми отложениями валдайского оледенения.

2.5.3. Радиоэкологическая обстановка

По данным [39] наибольшие концентрации ЕРН в Онежском регионе характерны для шунгитов, представляющих собой древние черные сланцы, сильно обогащенные углеродом предположительно органического происхождения. Концентрация радия-226 в этих породах колеблется от 80 до 265 Бк/кг, что в 2-4 раза превышает Кларк. При этом шунгиты характеризуются пониженными значениями содержания тория – от 4 до 18 Бк/кг. Это свидетельствует о связи урана и радия в шунгитах с органическим углеродом. Повышенными концентрациями радия и тория (175 и 160 Бк/кг, соответственно) характеризуются тоналиты. Плагииграниты, также широко распространенные в регионе, напротив, характеризуются пониженными концентрациями радия (6 - 18 Бк/кг) и высокой концентрацией тория (100-185 Бк/кг). Граниты, гнейсы и гранито-гнейсы региона характеризуются кларковыми концентрациями РН. Интересно отметить, что уран-ванадиевые руды при относительно высоких концентрациях урана (0,074-0,61 %) характеризуются низкими концентрациями радия-226 (5 – 30 Бк/кг) [39]. Это свидетельствует о существенном нарушении равновесия между ураном и радием и, возможно, о выщелачивании и выносе радия подземными водами.

В конце 70-х годов в Онежском прогибе южной части Балтийского щита силами ФГУП «Невскгеология» были выявлены новые урановорудные объекты с возможными запасами более 400 тонн. Месторождения Средняя Падма, Царевское, Космозеро и др. развиты в рифтогенной Онежской впадине, расположенной в юго-восточной части Балтийского щита. Наиболее

значимыми объектами среди них являются месторождение Карку в Северном Приладожье и группа месторождений Заонежья - Космозеро, Царевское и Средняя Падма.

Месторождение Средняя Падма было открыто в 1985. Всего на месторождении известно 11 рудных тел, залегающих на глубине от 55 до 310 метров. Главный полезный компонент руд - ванадий. Среднее содержание V_2O_5 на месторождении составляет 2,78%. Попутными компонентами в комплексных рудах месторождения также являются уран, золото, платина, палладий, молибден, серебро, медь и др. Среднее содержание урана в руде составляет 0,074-0,061 % и он представляет интерес только как попутный компонент. Золото и элементы платиновой группы и рений тесно ассоциируют с сульфидами.

В ходе геологоразведочных работ на месторождении Средняя Падма был выполнен большой объем буровых работ, пройдена шахта, глубиной около 150 м, извлечены на поверхность урансодержащие породы и руды. Глубина залегания рудных тел на данном месторождении колеблется от 55 до 310 м.

По состоянию на 2000 год разведочные работы были выполнены только на месторождении Средняя Падма, где были выявлены балансовые запасы ванадия по категориям А + В + С1 — 2111,8 тыс. т руды и 58,76 тыс. т V_2O_5 . по категории С2 — 2 477,9 тыс. т руды и 48,88 тыс. т V_2O_5 . [40].

Полевые работы, остановленные в 1994 г., были возобновлены с 2000 г.

В процессе геологоразведочных работ также выполнен комплекс специальных мероприятий по предотвращению негативных экологических последствий. Мероприятия включали:

- радиометрическую сортировку добытой породы на рудную и пустую массы;
- складирование рудной массы в объеме 3 000 м³ на бетонированной площадке склада-накопителя, построенного по спецпроекту ВНИПИ Промтехнологии;

- мониторинг качества подземных и шахтных вод;
- химическую очистку шахтных вод от радионуклидов на подземной установке: очищенные воды подавались в поверхностный отстойник;
- бурение осуществлялось только с промывкой для предотвращения загрязнения воздуха радиоактивной пылью;
- пылеподавление и растворение газов с помощью оросительных систем при взрывных работах;
- консервацию руды в соответствии с проектом, утвержденным Главным санитарным врачом Республики Карелия;
- «мокрую консервацию» разведочной шахты и подземных горных выработок после завершения геологоразведочных работ, закрытие устья ствола двумя бетонными перекрытиями и его засыпку;
- дезактивацию используемых оборудования и материалов;
- ликвидационный тампонаж пробуренных скважин.

В связи с тем, что промплощадка разведочной шахты на месторождении Средняя Падма представляет собой безлюдную и заболоченную местность, ликвидационные работы на поверхности заключались в засыпке заболоченной площадки песчано-галечным материалом из карьера и пустой породой из шахты. После чего площадку выравняли бульдозером и засаживали лесопосадками. После ликвидации шахты и консервации руды на всей площади рекультивированных земель выполнена детальная радиометрическая съемка, подтвердившая отсутствие на ней участков радиоактивного загрязнения. Как показали более поздние исследования, радиационная обстановка на территории сохраняется благополучной и спустя 10 лет после завершения работ на месторождении Средняя Падма, несмотря на то что значительные объемы добытой урансодержащей руды законсервированы на поверхности.

С учетом состава руд, содержащих значительные концентрации опасных химических элементов (уран, ванадий, молибден, селен и др.), и

размещения месторождения в бассейне Онежского озера на площади Заонежского полуострова с его уникальными историко-культурными и природными комплексами, месторождение законсервировано, а его отвалы рекультивированы.

В настоящее время концентрации радионуклидов в горных породах, почвах, а также донных отложениях и поверхностных водах оз. Падма и др. водоемов территории, прилегающей к месторождению, Средняя Падма, не превышает средних фоновых значений, характерных для Заонежья [41]. Однако, предполагаемая разработка уран-ванадиевого месторождения неизбежно приведет к поступлению на дневную поверхность рудной массы, а также глубинных подземных вод, обогащенных ураном, радием, радоном, а также нерадиоактивными химическими элементами. Наибольшая опасность связана с возможным поступлением к дневной поверхности, кроме вод, омывающих рудные тела, также вод хлоридного и гидрокарбонатно-хлоридного натриевого состава, для которых характерно повышенное содержание радия. С такими водами также связано высокое содержание радона, достигающее в одной из скважин месторождения значения $1,1 \cdot 10^5$ Бк/л [41]. Поступление таких вод на поверхность может нарушить сложившееся хрупкое равновесие в прилегающих экосистемах, прежде всего, в связи с дополнительным поступлением радионуклидов и тяжелых металлов в водоемы.

3. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ РИСКОВ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РАЙОНАХ ДОБЫЧИ УРАНОВЫХ РУД

С позиции санитарно-гигиенического благополучия населения территориальные риски для людей, проживающих на исследуемых территориях, определяются особенностями местности, а также воздействием производственной деятельности предприятий, расположенных в этих районах.

Очевидно, что территории добычи урана часто характеризуются повышенным содержанием РН уранового ряда в горных породах. Это, в свою очередь, определяет повышенный уровень природной радиоактивности на этих территориях, что является базовым источником территориальных рисков, которые связаны с повышенным содержанием природных радионуклидов в объектах окружающей среды, включая воду, используемую для питья, и пищевые продукты, выращенные в этих районах.

В дополнение к существующим природным территориальным рискам добавляются риски, связанные с особенностями воздействия на среду обитания человека действующих предприятий по добыче урановых руд.

3.1. Особенности технологических процессов добычи и переработки урановых руд и их влияние на формирование территориальных рисков для населения и окружающей среды

При современном уровне технологий добычи и обогащения урановых руд добыча урана экономически целесообразна только на месторождениях, содержащих концентрации по крайней мере около 1кг/т (0,1 %). Такие месторождения имеются в различных частях мира, включая Россию. Залежи урановых руд различаются геологическим расположением, размером, количеством содержащегося в руде урана, условиями доступа к месторождению. [42]

В России добыча урана осуществляется двумя основными методами: шахтным подземным методом добычи и методом ПВ. Открытым (карьерным) методом добычи уран в РФ добывался в г. Краснокаменск (рисунок 23), в настоящее время карьеры полностью выработаны и закрыты.

3.1.1. Добыча урана с извлечением и переработкой рудной массы

За исключением нескольких месторождений в Канаде, содержание урана в рудах обычно ниже 0,5%, поэтому, чтобы получить уран нужно добывать очень большое количество руды [42.] Это достигается применением шахтного и карьерного методов добычи.

Остановимся на шахтном методе добычи, поскольку карьерный в настоящее время не применяется.

Персонал предприятий, осуществляющих извлечение урановой руды, подвергается воздействию физических (пыль), химических (аэрозоли тяжелых металлов) и радиационных факторов производственной среды.



Рисунок 23 – Карьер, в котором уран добывался открытым способом (ППГХО им. Е.П. Славского, г. Краснокаменск)

Основной вклад в дозу облучения шахтеров на уранодобывающих предприятиях создают три радиационно-опасных фактора: короткоживущие ДПР радона, содержащиеся во вдыхаемом воздухе; долгоживущие альфа-излучающие РН уранового ряда в производственной пыли; внешнее гамма-излучение от пород и руд, а также продуктов распада радона, содержащихся в воздухе (рисунок 24).

Большие объемы извлекаемой рудной массы, а также вентиляция внутришахтных выработок для снижения облучения шахтеров от радона и его ДПР, обуславливают существенные объемы выбросов радона, других РН уранового ряда, силикатной пыли, тяжелых металлов и органических соединений в атмосферу.

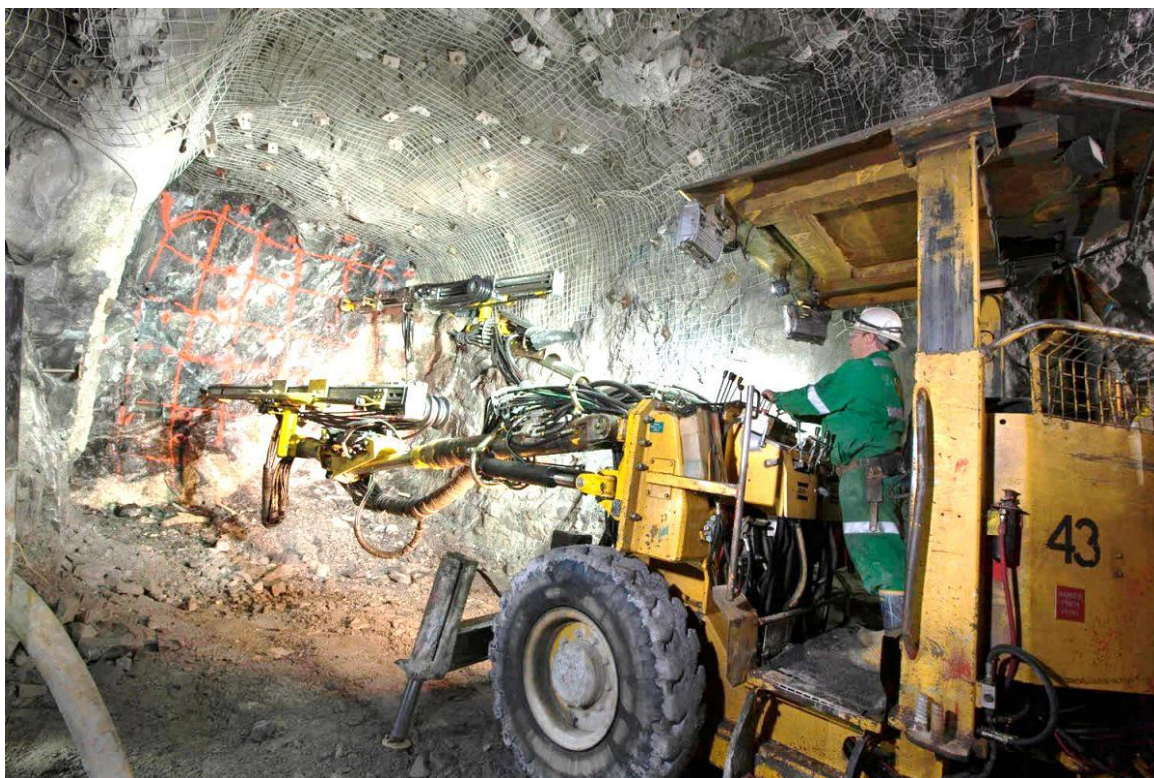


Рисунок 24 – Добыча урановой руды шахтным методом

Выбросы радона из подземных выработок также являются важной составляющей территориальных рисков, сохраняющихся после того, как урановые шахты будут закрыты.

Наряду с выбросами в атмосферный воздух, предприятия осуществляют сбросы больших объемов шахтных вод в открытую гидрогеологическую сеть. Установлено, что основными загрязнителями, представляющими опасность для окружающей среды, являются уран, радий, радон, а также сульфат ион и оксид мышьяка. Отсутствие эффективных технологий очистки сточных вод на заре становления и совершенствования производственных процессов добычи и переработки уранового сырья привело к тому, что в окружающую среду поступило существенное количество загрязняющих веществ, которые накопились в почве окружающих территорий, а также в донных отложениях открытых водоемов.

Источники загрязнения представляют собой также отвалы «пустой» породы (или горные отвалы), извлекаемой из недр в ходе добычи, которые складываются в больших объемах в непосредственной близости от устьев шахт.

Эти породы не содержат достаточного количества урана для промышленного извлечения, однако в них, как правило, наблюдаются высокие концентрации ЕРН за счет ореолов рассеяния урана, формирующихся вокруг рудных тел. При попадании пород из недр в открытую атмосферу происходят процессы окисления, приводящие к формированию химически агрессивной среды. Атмосферные осадки, просачиваясь через отвалы приобретают сильно кислую реакцию и активно выщелачивают химические элементы, включая радионуклиды, из материала отвалов. Попадание таких загрязненных вод в поверхностные и подземные воды представляют собой потенциальную угрозу. Также выделение радона с поверхности отвалов может играть некоторую роль в формировании территориальных рисков, учитывая большую площадь поверхности отвалов.

Руда, добытая в открытых или подземных шахтах, подвергается переработке на гидрометаллургических заводах. Заводы по переработке урановой руды обычно располагаются около шахт, чтобы сократить пути доставки радиоактивной породы для переработки и, соответственно, минимизировать риски для персонала и загрязнение окружающей среды.

Основные этапы технологического процесса включают в себя: дробление рудной массы, сортировку и транспортировку руды для последующего измельчения с применением мельниц, растворение урана (выщелачивание), удаление нерастворимой фракции, экстракцию урана с последующим осаждением с получением первичного продукта – желтого кека, сушку и тарирование. Перерабатываемая руда характеризуется высокой радиоактивностью, поскольку содержит радий-226, и его ДПР, которые концентрируются в процессе переработки рудной массы. Высокую радиационную опасность для персонала гидрометаллургического производства представляют операции по измельчению урановой руды. На данном этапе работники подвергаются внутреннему облучению при вдыхании радона, его ДПР, и радиоактивной пыли с высоким содержанием долгоживущих альфа-излучающих РН уранового ряда а также воздействию

внешнего гамма-излучения. Обедненная рудная масса размещается на территории предприятий в виде терриконов, а также в пустых карьерных выработках и является источником загрязнения окружающей среды.

Следующий этап технологического процесса заключается в переводе урана в растворенное состояние. Для выщелачивания чаще всего используется серная кислота. Сернокислотное выщелачивание характеризуется высокой степенью извлечения урана из руды (90–98%), но низкой степенью обогащения (содержание урана в солевой части раствора примерно в 20 раз больше содержания его в руде, составляя 3–5%).

Неблагоприятной радиационной обстановкой характеризуется третий этап производственного цикла, в процессе которого нерастворившийся твердый материал, содержащий соли радия, отделяется противоточным декантированием и поступает в отдельный производственный корпус, где осуществляется сбор и размещение на хранение образующихся хвостов обедненной породы.

Следующая технологическая стадия, связанная с экстракцией растворенного урана органическими растворителями и осаждением аммиаком гидроокиси урана является наиболее безопасной с точки зрения радиационного воздействия, поскольку основные источники загрязнения – соли радия, газообразный радон и радиоактивная пыль отсутствуют.

Радиационную опасность представляет последний этап технологического процесса – прокаливание желтого кека на открытом пламени, который применяют для удаления остаточной влажности. Прокаливание проводят при 800 градусах. Особую опасность вызывает мелкодисперсная урановая пыль, которая на данной стадии является основным источником внутреннего облучения персонала. Поэтому на данном этапе производственного цикла реализованы те же принципы защиты, которые применяются для обеспечения радиационной безопасности работ на начальных стадиях переработки и измельчения рудной массы (вентиляция, индивидуальные средства защиты).

Отходы от процесса обогащения с обогатительной фабрики имеют форму жидкого раствора. Жидкие отходы гидрометаллургических заводов представляют значительную опасность для окружающей среды в случае сброса их в гидрографическую сеть, что обусловлено содержанием в них ^{226}Ra , ^{230}Th и ^{210}Pb и высокой концентрацией вредных химических веществ.

В жидких отходах урановых гидрометаллургических предприятий содержится значительное количество химических веществ: серной кислоты, сульфатов, карбонатов, хлоридов и нитратов, оснований (аммиака, извести и т. п.), а в рафинатах после экстракционных процессов находятся алкилфосфаты, вторичные и третичные амины, спирты, керосин. Наконец, при переработке руды выщелачиваются: железо, медь, ванадий, молибден, мышьяк, свинец, фтор и т. п. За рубежом в последние годы были установлены новые, более жесткие нормы концентрации химических веществ в сбросных растворах урановых гидрометаллургических заводов.

Вследствие применения различных механических и химических процессов обработки урановой руды РН переходят в более миграционно подвижные формы. Поэтому в большинстве случаев сброс отходов в подземные шахты невозможен из-за высокой опасности загрязнения подземных вод. Они обычно откачиваются в искусственные котлованы для длительного захоронения (т.н. хвостохранилища). Не считая удалённого урана, жидкие отходы содержат все элементы руды. Поскольку продукты распада урана из руды не выделяют, отходы содержат до 85 % от природной радиоактивности руды, обусловленной, главным образом, радием-226 и его ДПР. В жидких отходах урановых гидрометаллургических предприятий содержится значительное количество химических веществ: серной кислоты, сульфатов, карбонатов, хлоридов и нитратов, оснований (аммиака, извести и т. п.), а в рафинатах после экстракционных процессов находятся алкилфосфаты, вторичные и третичные амины, спирты, керосин. Наконец, при переработке руды выщелачиваются: железо, медь, ванадий, молибден, мышьяк, свинец, фтор и т. п. [43]

Хвостохранилища являются источниками загрязнения окружающей среды. При высыхании поверхности хвостохранилищ увеличивается вероятность пылепереноса загрязнителей, а также эксхалации радона с их поверхности и, соответственно, риски ингаляционного поступления радионуклидов уранового ряда и других химических загрязнителей (тяжелых металлов) в объекты окружающей среды и организм человека.

Инфильтрация загрязнителей из хвостохранилищ вповерхностные водооток и подземные водоносные горизонты, обусловленная деградацией со временем изолирующих материалов, создает существенные территориальные риски для населения и окружающей среды в виде химического и радиоактивного загрязнения грунтовых и поверхностных вод. Загрязнение подземных вод особое значение имеет для районов, где подземные воды являются единственным источником питьевого водоснабжения населения, проживающего в районе расположения предприятий.

Таким образом, оценивая потенциальные долгосрочные территориальные риски для населения и окружающей среды в районе расположения уранодобывающих предприятий, занимающихся шахтным и открытым способами добычи руды, следует отметить, что ключевым из них является загрязнение поверхностных и подземных экосистем долгоживущими радионуклидами и тяжелыми металлами, которые в качестве побочного продукта концентрируются в отходах производства. Крупные масштабы извлекаемых руд, а также агрессивные химические компоненты, используемые в процессе ее переработки, обуславливают возможности локальных геохимических изменений в местах добычи урана и изменение подвижности ЕРН в окружающей среде.

3.1.2. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания

В современной промышленности в силу отсутствия богатых урановых руд (исключения составляют канадские месторождения, где концентрация

урана доходит до 30% и австралийские с содержанием урана до 3%) активно применяется метод подземного выщелачивания руд. Это - один из самых рентабельных и экологически чистых способов добычи.

Сущность метода скважинного ПВ заключается в избирательном переводе полезного компонента (урана) в жидкую фазу путем управляемого движения растворителя по рудным телам в естественном залегании и подъему насыщенного ураном раствора на поверхность. С этой целью через скважины, пробуренные с поверхности в пласт полезного ископаемого нагнетается химический реагент, способный переводить минералы полезного ископаемого в растворимую форму. Раствор, пройдя часть рудного пласта, через другие скважины поднимается на поверхность и далее по трубопроводу транспортируется к установкам для переработки. Далее он непосредственно поступает на сорбционное, гидрометаллургическое извлечение и одновременное концентрирование урана (рисунок 25).

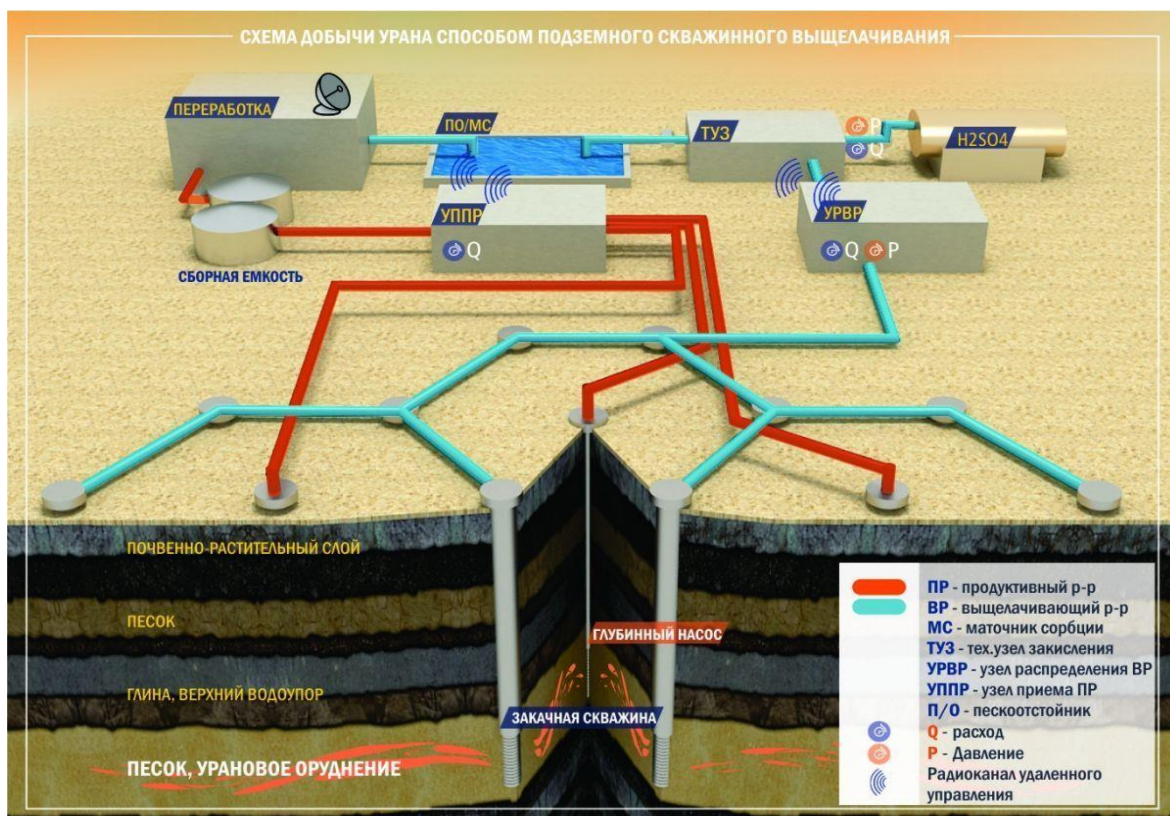


Рисунок 25 – Схема добычи урана методом подземного выщелачивания

Важнейшими природными предпосылками применения скважинного ПВ являются способность урана и его соединений переходить в раствор при

воздействии на рудный пласт выщелачивающего реагента, а также возможность фильтрации выщелачивающих растворов в породах продуктивного горизонта. Эта технология может использоваться только там, где месторождения урана расположены в водоносном слое в водопроницаемой породе, не слишком глубоко (приблизительно 200 – 300 м), и граничащие с водонепроницаемой породой. Выбор растворителя для скважинного ПВ зависит от состава руд. Наиболее широкое применение находят водные растворы кислот (серной, соляной, азотной) или соды.

Метод подземного скважинного выщелачивания является наиболее привлекательным способом добычи урана с точки зрения упрощенности технологических операций. При данном методе не происходит изменения геологического состояния недр, так как не производится выемка горнорудной массы. В процессе скважинного выщелачивания в подвижное состояние в недрах переходит и выводится на поверхность менее 5% радиоактивных элементов по сравнению со 100% при традиционных способах добычи урана. Отпадает необходимость строительства хвостохранилищ для хранения отходов с высоким уровнем радиации. Есть небольшие пескоотстойники, которые после завершения добычи легко рекультивировать. Главные недостатки - риск отклонения выщелачивающих жидкостей от месторождения урана и последующего загрязнения грунтовой воды, и невозможность восстановления естественных условий в зоне выщелачивания после окончания операций².

² «Исторически выщелачивание использовалось в большом масштабе там, где есть крупные месторождения - оно включало ввод миллионов тонн серной кислоты, в Stráz pod Ralskem, Чешская Республика, в различных местах в Болгарии, и немного в Königstein, в Восточной Германии. В случае Кёнигштайна, в общей сложности 100 000 тонн серной кислоты были введены с жидкостью в месторождение руды. После закрытия месторождения, 1,9 миллиона кубометров этой жидкости остаётся в порах породы; ещё 0,85 миллиона кубометров такой жидкости находятся где-то между зоной выщелачивания и предприятием по обработке. Жидкость содержит высокие концентрации опасных примесей. Если сравнивать с допустимыми для питьевой воды концентрациями, то кадмия там больше в 400 раз, мышьяка - в 280, никеля - в 130, урана - в 83 раза. Эта жидкость представляет опасность с точки зрения загрязнения водоносного слоя. Проблема загрязнения грунтовой воды намного серьезнее в Чехии, в Stráz

Вместе с тем, в процессе выщелачивания по-прежнему существует опасность выбросов радиоактивной пыли, радона и выщелачивающей жидкости, однако, в количествах существенно ниже тех, которые имеют место при шахтном способе добычи урановой руды.

3.1.3. Источники загрязнения окружающей среды, формирующие территориальные риски для населения, проживающего в районах расположения предприятий по добыче урановой руды

Подземные выработки, в том числе и законсервированные, являются долговременным источником поступления загрязнителей в окружающую среду. Источниками радиоактивного загрязнения являются:

- шахтные воды, поступающие из отработанных рудников в подземные и поверхностные воды;
- шахтный воздух, поступающий из вентиляционных систем;
- неликвидированные горные выработки (стволы шахт, карьеры, провалы поверхности и т.д.);
- нарушенная подземная геосреда, определяющая особенности формирования и распространения подземных потоков радиоактивного газа радона;
- временные водотоки, образованные аварийными сбросами рудничных вод.

Размещенные на поверхности земли отвалы и хвостохранилища являются источниками непрерывного и долговременного радиоактивного и химического загрязнения окружающей среды:

pod Ralskem, где было закачано 3,7 миллиона тонн серной кислоты: 28,7 миллиона кубометров загрязнённой жидкости до сих пор содержатся в зоне выщелачивания, расположенной на территории размером 5,74 кв. км. Кроме того, загрязнённая жидкость распространилась вне зоны выщелачивания горизонтально и вертикально, подвергая угрозе заражения территорию примерно в 28 кв. км. и 235 миллионов кубометров грунтовой воды».

- поверхностных и подземных вод – вследствие вымывания из отвалов атмосферными осадками и поверхностными водотоками токсичных и радиоактивных элементов. Деграция и разрушение защитных, дренажных сооружений хвостохранилищ и отвалов могут привести к выносу радионуклидов в окружающую среду и загрязнению территории, поверхностных и подземных источников водоснабжения;

- атмосферы – за счет выделения (эксхалации) радона, который ветром переносится на большие расстояния (до 4-5 км), и радиоактивной пыли, образующейся в результате физико-химического выветривания и ветровой эрозии приповерхностного слоя.

К другим источникам радиационной опасности следует отнести:

- радиоактивно-загрязненные территории промплощадок, а также локальные участки вдоль автодорог из-за просыпи рудной массы;

- радиоактивно-загрязненные участки на территории населенных пунктов, образовавшиеся в результате несанкционированного использования материалов отвалов для строительства и хозяйственных нужд;

- аварийные проливы на площадках ПВ, обусловленные негерметичностью выкачивающих скважин, могут являться причиной закисления поверхностных грунтов и выносом урана в грунтовые горизонты.

Сравнительная характеристика динамики штатных выбросов и сбросов при добыче урана шахтным методом и методом скважинного ПВ на примере трех действующих в настоящее время предприятий по добыче урана (ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского», АО «Далур» и АО «Хиагда») приведена в Приложениях А и Б.

3.2. Основные пути радиационного воздействия на человека и окружающую среду

Пути радиационного воздействия на человека и окружающую среду показаны на схеме (рисунок 26).

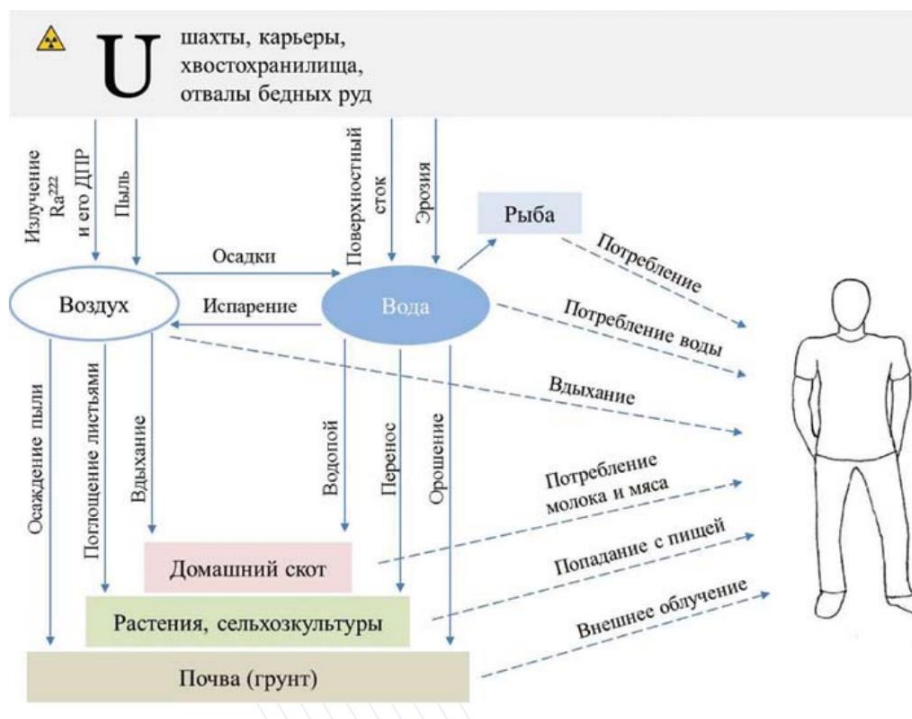


Рисунок 26 – Основные пути воздействия техногенных источников предприятий уранодобывающей промышленности на окружающую среду и человека [44]

Наиболее значимыми путями облучения человека являются:

- внешнее гамма-облучение от ЕРН, содержащихся в почве;
- внутреннее облучение от ингаляционного поступления радона и его ДПР;
- внутреннее облучение от ингаляционного поступления радионуклидов с пылью, содержащейся в воздухе;
- внутреннее облучение от перорального поступления радионуклидов с питьевой водой;
- внутреннее облучение от перорального поступления пищевых продуктов, выращенных на приусадебных участках, поливаемых шахтными водами и водой из поверхностных водоемов

Объектами контроля за показателями радиационной безопасности населения и состояния объектов окружающей среды являются:

- атмосферный воздух на территории населенных пунктов;
- почва населенных пунктов и их ареалов;
- вода открытых водоемов;

- подземные воды;
- питьевая вода;
- продовольственное сырье и пищевые продукты.

Как упоминалось выше, одной из важнейших составляющих территориальных рисков в районах, прилегающих к местам добычи урановых руд, является повышенное содержание радионуклидов уранового ряда в геологической среде (горных породах и подземных водах), обусловленное естественными причинами. Этот фактор может обуславливать повышенное облучение населения радоном в домах, а также повышенные поступления радионуклидов с питьевой водой в случае использования подземных источников для водоснабжения.

3.3. Контролируемые параметры загрязнения окружающей среды

Основными контролируемыми параметрами, характеризующими безопасность населения и загрязнение объектов окружающей среды на наблюдаемых территориях, являются:

- мощность дозы гамма-излучения в жилых и общественных зданиях и на открытой местности на территории населенных пунктов;
- содержание радиоактивных и химических веществ в атмосферном воздухе,
- содержание ЕРН и химических веществ в атмосферных выпадениях на территории населенных пунктов;
- содержание радионуклидов и токсичных металлов в почве населенных пунктов и их ареалов;
- среднегодовые значения ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых и общественных помещений на территории населенного пункта;
- ППР из грунта в населенных пунктах, а также с поверхности хвостохранилищ и отвалов;
- суммарная альфа- и бета-активность, содержание ЕРН и токсичных металлов и галогенов в воде открытых водоемов и питьевой воде;

- содержание радионуклидов и токсичных металлов в продовольственном сырье и пищевых продуктах.

Проведение мониторинга на всех уровнях осуществляется путем выполнения измерений, сбора, хранения, обработки и анализа численных значений показателей радиационной безопасности населения и состояния объектов окружающей среды. Существенное изменение уровней контролируемых параметров в ходе мониторинга может быть сигналом, свидетельствующим об изменении экологических условий и характера загрязнения территории, что требует проведения специального анализа и возможного принятия мер по снижению воздействия радиационно-опасных факторов. Численные значения перечисленных параметров являются основой для проведения расчетов доз внешнего и внутреннего облучения населения, а также оценки химического загрязнения среды обитания.

4. НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ, ПРОЖИВАЮЩЕГО В РАЙОНАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ДОБЫЧЕ И ПЕРЕРАБОТКЕ УРАНОВЫХ РУД

Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах расположения объектов уранодобывающей и перерабатывающей промышленности, определяется комплексом мер, направленных на ограничение облучения населения от источников природного облучения. Регулирование опирается на комплекс действующих документов санитарного законодательства в этой области [23, 45 и 46].

Руководствуясь установленными в этих нормативных актах санитарно-гигиеническими требованиями к показателям радиационной безопасности участков застройки и внутренней среды здания, разрабатываются методические указания и рекомендации по осуществлению контроля за соблюдением установленных нормативов. Нормативными актами, регламентирующими различные этапы строительной деятельности, которыми предусмотрено выполнение установленных в санитарных нормах требований, являются строительные нормы и правила (СНиП), технические регламенты, межгосударственные стандарты (ГОСТ) и национальные стандарты Российской Федерации (ГОСТ Р), своды правил, руководящие документы в строительстве (РДС); территориальные строительные нормы (ТСН), стандарты организаций (ТСО). В настоящее время введен в действие на федеральном и региональном уровне ряд нормативных актов, среди которых свод правил по инженерно-экологические изыскания для строительства [47]; свод правил по проектированию противорадоновой защиты [48]. Представленные нормативные акты являются основой отечественной базы регулирования радиационной безопасности населения при воздействии ПИИИ.

4.1. Требования по защите населения от радона в коммунальных условиях

Для коммунальных условий требования по ограничению облучения населения за счет радона реализуются при осуществлении строительства новых и эксплуатации существующих зданий. При выборе участков под строительство зданий жилищного и общественного назначения руководствуются следующими требованиями (п. 5.1.6 ОСПОРБ 99/2010) [46]:

- мощность эквивалентной дозы гамма-излучения на площади должна быть менее 0,3 мкЗв/ч;
- ППР с поверхности грунта не более 80 мБк/(м²·с).

При несоблюдении этих требований при проектировании здания должна быть предусмотрена система защиты от повышенных уровней гамма излучения и радона. Степень радонозащиты определяется результатами оценки категории потенциальной радоноопасности участка при проведении инженерных радонозащитных мероприятий при намечаемом строительстве в соответствии с СП 502.1325800.2021 [47]. При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы среднегодовая ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений не превышала 100 Бк/м³, а мощность эффективной дозы гамма-излучения в помещениях не превышала мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч (п. 5.3.2 НРБ-99/2009) [23].

В эксплуатируемых жилых и общественных зданиях среднегодовая ЭРОА изотопов радона не должна превышать 200 Бк/м³. При более высоких значениях ЭРОА, а также мощности эффективной дозы гамма-излучения в помещениях, превышающей это значение на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч, должны проводиться защитные мероприятия, в т.ч. направленные на снижение поступления радона в воздух помещений и улучшение вентиляции помещений (п. 5.3.3 НРБ-99/2009) [23]. При

несоответствии показателей радиационной безопасности жилых и общественных зданий действующим нормативам и невозможности в результате экономически обоснованных защитных мероприятий снизить значения одного или обоих показателей до нормативного рассматривается вопрос о переселении жильцов и перепрофилировании здания или части помещений или о сносе здания (п. 5.1.4 ОСПОРБ 99/2010, п. 4.2.6 и 4.2.7 СанПиН 2.6.1.2800-10) [45,46].

4.2. Требования по ограничению облучения населения от радона в производственных условиях³

В соответствии с п. 4.1 НРБ-99/2009 «эффективная доза облучения природными источниками излучения всех работников, включая персонал, не должна превышать 5 мЗв в год в производственных условиях (любые профессии и производства)» [23]. Это требование по ограничению природного облучения относится к суммарной дозе облучения работников без разделения ее на вклад за счет показателей радиационной безопасности здания и самого производства, ввиду отсутствия в нормативных документах требования к производственным зданиям и сооружениям. При проектировании новых производственных зданий в соответствии с п. 5.2.1 ОСПОРБ 99/2010 [46] должно быть предусмотрено, чтобы после окончания их строительства, капитального ремонта или реконструкции среднегодовая ЭРОА радона не превышала 150 Бк/м³, а мощность эквивалентной дозы гамма-излучения не превышала 0,6 мкЗв/ч. В эксплуатируемых производственных объектах среднегодовые значения ЭРОА изотопов радона в помещениях эксплуатируемых производственных зданий и сооружений не должны превышать 300 Бк/м³, а мощность эквивалентной дозы гамма-излучения – 0,6 мкЗв/ч. При несоответствии установленным требованиям имеется единственная возможность дальнейшего их использования –

³ Не распространяется на персонал урановых рудников

перепрофилирование здания или части его помещений (п. 5.2.2 ОСПОРБ 99/2010) [46]. Для обеспечения выполнения требований п. 5.2.1 ОСПОРБ 99/2010 [46] под строительство производственных зданий и сооружений «...выбирают участки территории, на которых мощность эквивалентной дозы гамма-излучения не превышает 0,6 мкЗв/ч, а ППР с поверхности грунта в пределах контура застройки составляет менее 250 мБк/(м²·с). При проектировании здания на участке с мощностью эквивалентной дозы гамма излучения выше 0,6 мкЗв/ч, плотностью потока радона с поверхности грунта более 250 мБк/(м²·с) в проекте должна быть предусмотрена система защиты здания от повышенных уровней гамма-излучения и радона» (п. 5.2.3 ОСПОРБ 99/2010) [46].

4.3. Требования ограничения облучения населения от ПИИИ при потреблении питьевой воды

Удельная активность радиоактивных веществ в воде источников питьевого водоснабжения является одним из важнейших показателей качества питьевой воды. Мониторингу этого показателя должно отводиться важное место в региональных программах радиационного мониторинга в районах расположения предприятий уранодобывающей промышленности. Основной объем первичного мониторинга должен быть направлен на определение суммарной удельной альфа- и бета-активности питьевой воды во всех основных источниках питьевого водоснабжения [49].

Предварительная оценка качества воды по показателям радиационной безопасности проводится по удельной суммарной альфа- (A_α) и бета-активности (A_β). Для воды подземных источников водоснабжения одновременно с измерением удельной суммарной альфа- и бета-активности необходимо определять содержание в ней радона.

Таким образом, вода соответствует требованиям радиационной безопасности, если одновременно выполняются следующие условия:

$$A_\alpha + U_\alpha \leq 0,2 \text{ Бк/кг}$$

$$A_{\beta} + U_{\beta} \leq 1,0 \text{ Бк/кг} \quad (1)$$

$$A_{Rn} + U_{Rn} \leq 60 \text{ Бк/кг}$$

Где A_{α} , A_{β} , A_{Rn} - соответственно, значения суммарной альфа-активности, суммарной бета активности и удельной активности радона в пробах воды; U_{α} , U_{β} , U_{Rn} - соответственно, неопределенность оценки суммарной альфа-активности, суммарной бета активности и удельной активности радона в пробах воды. Если превышено значение суммарной альфа- или бета-активности, то необходимо выполнить полный анализ содержания радионуклидов в воде. Вода признается безусловно соответствующей требованиям радиационной безопасности, если:

$$\sum \frac{A_i}{УВ_i} + \sqrt{\sum \left(\frac{U_i}{УВ_i}\right)^2} \leq 1,0 \quad (2)$$

где A_i – измеренная удельная активность i -го радионуклида в воде, включая Rn-222;

$УВ_i$ – соответствующий уровень вмешательства для i -го радионуклида, Бк/кг,

то мероприятия по снижению радиоактивности питьевой воды не являются обязательными.

Таблица 18 – Уровни вмешательства (УВ) по удельной активности радионуклидов в питьевой воде [23]

Радионуклид и вид излучения	$T_{1/2}$	$УВ^{вода}$ (Бк/кг)
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность достижения или превышения значений УВ высокая		
$^{234}\text{U} (\alpha)$	$2,44 \times 10^5$ лет	2,8
$^{238}\text{U} (\alpha)$	$4,47 \times 10^9$ лет	3,0
$^{226}\text{Ra} (\alpha)$	$1,60 \times 10^3$ лет	0,49
$^{228}\text{Ra} (\beta)$	5,75 лет	0,2
$^{224}\text{Ra} (\alpha)$	3,66 сут	2,1

$^{210}\text{Po} (\alpha)$	138 сут	0,11
$^{222}\text{Rn} (\alpha)$	3,82 сут	60
Радионуклиды распространены повсеместно, достижение или превышение значений УВ возможно в отдельных случаях		
$^{210}\text{Pb} (\beta)$	22,3 лет	0,2
$^{228}\text{Th} (\alpha)$	1,91 лет	1,9
$^{230}\text{Th} (\alpha)$	$7,70 \times 10^4$ лет	0,65
$^{232}\text{Th} (\alpha)$	$1,40 \times 10^{10}$ лет	0,6

Если для воды источника питьевого водоснабжения условие (1) выполняется, то меры по снижению содержания радионуклидов не требуются. При выполнении условия (1) контроль осуществляется по показателям удельной суммарной альфа- и бета-активности, а для подземных источников и по содержанию радона.

При невыполнении условия (2) рассматривается вопрос о целесообразности разработки и осуществления защитных мероприятий с учетом принципа оптимизации. Обоснование характера вмешательства проводится в каждом конкретном случае на основании взвешивания пользы и вреда для здоровья населения с учетом результатов исследований воды используемых и альтернативных источников питьевого водоснабжения по совокупности показателей биологической, химической, радиационной безопасности и органолептических свойств, а также возможного ущерба в связи с прерыванием или ограничением водопотребления.

Если при совместном присутствии в воде действующих источников питьевого водоснабжения нескольких ЕРН условие (2) превышено не более чем в 10 раз, то вода признается соответствующей требованиям радиационной безопасности при обязательном установлении производственного контроля за содержанием основных радионуклидов в воде. При этом рассматриваются возможные способы снижения удельной активности отдельных радионуклидов в воде и принимается решение о

целесообразности осуществления защитных мероприятий, направленных на уменьшение содержания радионуклидов в питьевой воде.

Если при совместном присутствии в воде действующих источников питьевого водоснабжения нескольких ЕРН условие (3) превышено более чем в 10 раз, то вопрос об использовании ее для питьевого водоснабжения населения в каждом конкретном случае решается на основании санитарно-эпидемиологического заключения Федерального органа исполнительной власти, уполномоченного осуществлять государственный санитарно-эпидемиологический надзор. Одновременно утверждается план мероприятий по обеспечению качества воды, соответствующей гигиеническим нормативам, включая календарный план работ, сроки их выполнения и объемы финансирования.

4.4. Требования ограничения облучения населения от ПИИИ, содержащихся в минеральном сырье, стройматериалах, и промышленных отходах

Строительные материалы вносят вклад во внешнюю дозу гамма-излучения и в ряде случаев являются источником внутреннего облучения за счет эманации радиоактивного газа радона. Как правило, вклад радона, поступающего в помещение из конструкционных материалов незначителен, по сравнению с основным источником его поступления в помещение из грунта. С другой стороны, как показали последние исследования, этот источник нельзя недооценивать, особенно в районах проживания населения вблизи предприятий по добыче и переработке урановых руд.

Другой, не менее важной гигиенической задачей, связанной с контролем содержания ЕРН, является обеспечение радиационной безопасности персонала и населения при обращении с отходами промышленных производств. Образование отходов с повышенным содержанием ЕРН является характерной особенностью предприятий по добыче и переработке урановых руд.

Источником природной радиоактивности минерального сырья, строительных материалов и отходов промышленного производства являются радионуклиды рядов урана и тория, а также ^{40}K ($T_{1/2} = 1,25 \times 10^9$ лет). Согласно данным НКДАР ООН [50], среднемировые значения активности ЕРН в почве характеризуются следующими значениями 33 Бк/кг для ^{238}U , 45 Бк/кг для ^{232}Th и 412 Бк/кг для ^{40}K .

Учитывая особенности распределения ЕРН в окружающей среде, их физико-химические свойства, а также значимость вклада в формирование дозы внешнего облучения человека основными контролируруемыми ЕРН являются ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K [51]. Принимая значения гамма-постоянных этих радионуклидов (1, 1,3 и 0,09, соответственно) наибольший вклад в мощность дозы внешнего гамма-излучения (45 %) вносит торий-232 с ДПР, вклад радия-226 с ДПР составляет 26 %, а вклад калия-40 – около 29 %.

В целях надзора за состоянием радиационной безопасности минерального сырья, стройматериалов, и производственных отходов, содержащих ЕРН, в качестве критерия их потенциальной радиационной опасности принята величина $A_{эфф}$.

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3 \cdot A_{Th} + 0,09 \cdot A_K \quad (3)$$

где A_{Ra} и A_{Th} - удельная активность ^{226}Ra и ^{232}Th , находящихся в радиоактивном равновесии со своими ДПР, а A_K – удельная активность ^{40}K , Бк/кг.

В целях обеспечения радиационной безопасности населения нормирование содержания ЕРН в минеральном сырье, стройматериалах и промышленных отходах различных производств осуществляется по показателю $A_{эфф}$. В соответствии с НРБ 99/2009 $A_{эфф}$ ЕРН в строительных материалах (сырьё), добываемых на их месторождениях (щебень, гравий, песок, бутовый и пиленный камень, цементное и кирпичное сырье и пр.) или являющихся побочным продуктом производства, в отходах промышленного

производства, используемых для изготовления строительных материалов (золы, шлаки и пр.), а также в готовой продукции, не должна превышать [23]:

– для материалов, используемых при строительстве (реконструкции, капитальном ремонте) жилых и общественных зданий (I класс):

$$A_{эфф} \leq 370, \text{ Бк/кг},$$

– для материалов, используемых в дорожном строительстве в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки (II класс):

$$370 \leq A_{эфф} \leq 740, \text{ Бк/кг};$$

– для материалов, используемых в дорожном строительстве за пределами населенных пунктов и зон перспективной застройки (III класс):

$$740 \leq A_{эфф} \leq 1500, \text{ Бк/кг}.$$

Использование сырья и материалов с $A_{эфф}$ более 1500 Бк/кг для строительства жилых, общественных и производственных зданий и сооружений, а также в дорожном строительстве не допускается.

$A_{эфф}$ ЕРН в изделиях и материалах, используемых для наружной и внутренней облицовки зданий (керамическая и керамогранитная плитка, облицовочные изделия из природного и искусственного камня и т.п.), не должна превышать 740 Бк/кг.

В соответствии с ОСПОРБ 99/2010 нормируется содержание ЕРН в отходах промышленного производства. Производственные отходы с $A_{эфф}$ ЕРН до 1500 Бк/кг могут направляться для захоронения в места захоронения промышленных отходов без ограничений по радиационному фактору [46]. Производственные отходы с $A_{эфф}$ ЕРН 1,5 до 10 кБк/кг направляются для захоронения на специально выделенные участки в места захоронения промышленных отходов [46]. Захоронение производственных отходов с $A_{эфф}$ ЕРН более 10 кБк/кг производится с соблюдением требований, установленных при захоронении низкоактивных радиоактивных отходов (таблица 19) [46].

Таблица 19 – Нормативы по отнесению твердых материалов к отходам и строительным материалам [46]

Пригодность твёрдого материала	Нормативные ссылки	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг $A_{EPH}=A_{226Ra}+1,3A_{232Th}+0,09A_{40K}$	
		От	До
Материалы для строительства жилых и общественных зданий (I класс)	СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009), п. 5.3.4 [6] ГОСТ 30108-94 [3], приложение А	0	370
Материалы для дорожного строительства в пределах населённых пунктов и строительства производственных зданий и сооружений (II класс)	СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009), п. 5.3.4 [6] ГОСТ 30108-94 [3], приложение А	370	740
Материалы для дорожного строительства вне пределов населённых пунктов (III класс)	СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009), п. 5.3.4 [6] ГОСТ 30108-94 [3], приложение А	740	1,5E+03
Материалы в каждом отдельном случае используются только на основании санитарно-эпидемиологического заключения (IV класс)	СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009), п. 5.3.4 [6] ГОСТ 30108-94 [3], приложение А	1,5E+03	4,0E+03
Материалы в строительстве не используются (промышленные отходы)	СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009), п. 5.3.4 [6] ГОСТ 30108-94 [3], приложение А	4,0E+03	1,0E+04
Материалы отнесены к РАО	СП 2.6.1.2612-10 (ОСПОРБ 99/2010) [8], п. 3.12.1	1,0E+04	∞

Важно также отметить, что наряду с допустимыми уровнями ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений в отечественных нормативных актах определены критерии, характеризующие степень радиационной безопасности населения, проживающего на территориях с повышенным природным радиационным фоном. Согласно п. 5.1.2 ОСПОРБ 99/2010 [46] при суммарных эффективных дозах облучения от всех основных ПИИИ менее 5 мЗв/год степень радиационной безопасности населения считается приемлемой, при дозах свыше 5 до 10 мЗв/год – повышенной, а при дозах более 10 мЗв/год – высокой. Мероприятия по снижению уровней облучения

природными источниками излучения должны осуществляться в первоочередном порядке для групп населения, подвергающихся облучению в дозах более 10 мЗв/год.

5. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

5.1. Целеобусловленность радиационных измерений

Необходимость выполнения измерений радиационных характеристик природных источников ионизирующих излучений обусловлена требованиями нормативных документов, определяющих порядок обеспечения радиационной безопасности населения, а также научной и производственной деятельностью различных предприятий и ведомств, осуществляющих сбор и обработку измерительной информации.

Основными нормативными и методическими документами, определяющими перечень сред и объектов контроля, а также контролируемых величин, являются [НРБ-99/2009; ОСПОРБ-99/2010; СанПиН 2.1.4.1074-01; СанПиН 2.3.2.1078-01; МУ 2.6.1. 2398-08; МУ 2.6.1.2838-11].

Измерения с целью обеспечения требований радиационной безопасности производятся аккредитованными лабораториями в соответствии с методиками выполнения измерений, разработанными и аттестованными согласно ГОСТ 8.010-2013[52] и ГОСТ 8.638-2013[53] с использованием средств измерений, зарегистрированных в государственном реестре СИ и имеющих метрологическую прослеживаемость к государственному эталону соответствующей измеряемой величины.

Измерения с целью анализа данных по природным источникам, а также в рамках научной деятельности, накапливаются в банках и базах данных различных организаций, наиболее крупными среди которых являются:

- федеральный банк данных по облучению населения РФ, части которого базируются в ФБУН СПб НИИРГ им. Рамзаева;
- -ведомственный банк ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна;
- -база данных информационно-аналитической системы по природным источникам ионизирующих излучений (ИАС ПИИИ) ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России [54].

5.2.Классификация и характеристики средств измерения ионизирующих излучений

В зависимости от измеряемой величины средства измерений принято разделять на радиометры, спектрометры, дозиметры и универсальные приборы.

Радиометрами называют средства измерений активности, производных от активности величин (удельной, объемной активности, плотности потока радона и т.п.) а также флюенса или плотности потока альфа- бета-частиц или гамма-квантов. В основе радиометрических методов измерений лежит подсчет количества фактов взаимодействия квантов ионизирующего излучения с детектором.

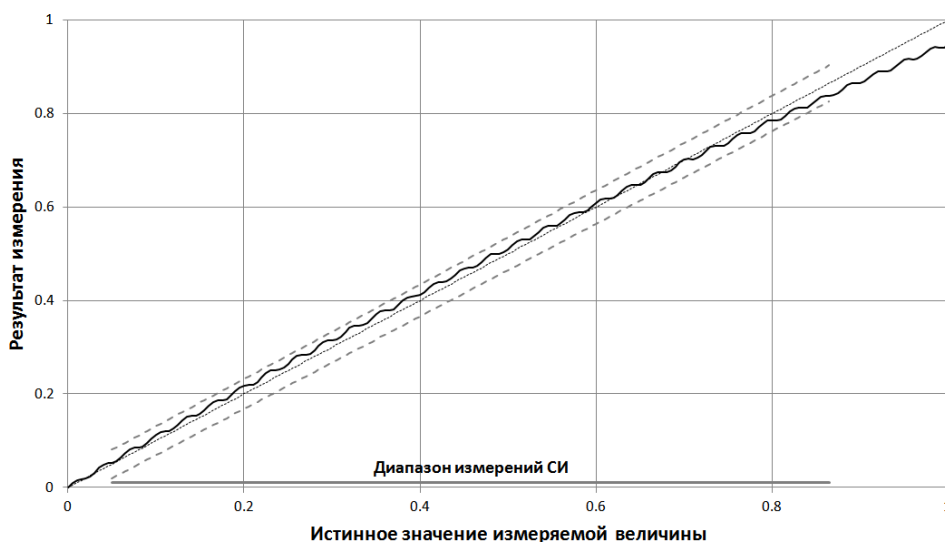
Спектрометрами называют средства измерений энергии квантов ионизирующего излучения. Спектрометрические методы измерения основаны на преобразовании энергии, переданной квантом излучения детектору, в электрический импульс, амплитуда которого пропорциональна этой энергии, и последующем измерении амплитуд электрических импульсов.

Дозиметрами называют средства измерений воздействия ионизирующих излучений на то или иное вещество. Средства измерений экспозиционной дозы измеряют воздействие на воздух, средства измерений поглощенной и эквивалентной дозы - воздействие на биологическую ткань. Дозиметрические методы измерений основаны на использовании тканеэквивалентных детекторов, которые преобразуют меру воздействия (поглощенную энергию или заряд) в электрический ток или другую измеряемую величину. В бытовых дозиметрических измерениях в качестве дозиметров часто применяют радиометрические приборы (счетчики Гейгера или сцинтилляционные счетчики), в которых количество фактов взаимодействия частиц с детектором умножается на некоторый

коэффициент. Область применения таких приборов ограничивается условиями, для которых этот коэффициент можно считать постоянным.

Универсальные средства измерений сочетают в себе возможности измерений нескольких величин. Наиболее распространенными универсальными приборами являются полевые радиометры-дозиметры и лабораторные радиометры, выполненные на базе спектрометров.

Основной характеристикой любого средства измерений является функция преобразования – зависимость фиксируемого средством измерения результата измерения выходного параметра от значения измеряемой величины. Большинство современных СИ отображают значение измеряемого параметра уже в единицах измеряемой величины, т.е. выводят на экран не значение фиксируемого тока, напряжения или количества импульсов, а результат их преобразования в единицы измерения активности или мощности дозы. Для таких СИ идеальная функция преобразования должна иметь вид $Y=X$ – линейной функции, изображенной мелкой пунктирной линией на рисунок 27



Прямая линия $Y=X$ (мелкий пунктир) – функция преобразования идеального средства измерений. Волнистая изогнутая линия – функция преобразования реального СИ. Периодические изменения называют дифференциальной нелинейностью, а общий изгиб – интегральной нелинейностью. Отображенные крупным пунктиром границы вокруг прямой $Y=X$ соответствуют основной погрешности – паспортной характеристике средства измерений.

Рисунок 27 – Типичный вид функции преобразования средства измерений

В действительности вид функции преобразования отличается от прямой линии. Степень отклонения функции преобразования от линейной зависимости принято характеризовать характеристиками точности средства измерения, состав которых различен в зависимости от типа СИ.

Для всех типов СИ обязательно указывают диапазон измерений и основную погрешность измерения [55]. Диапазон измерений – это диапазон значений измеряемой величины, в пределах которого определены (верны) приведенные в описании СИ характеристики точности. Основная погрешность измерения представляет собой установленные для данного типа СИ границы диапазона, в пределах которого находится погрешность измерения. Основная погрешность может задаваться в относительных или абсолютных единицах в виде одного значения, формулы или таблицы, определяющей её зависимость от значения измеряемой величины. Помимо основной погрешности измерения приводят также величины, характеризующие дополнительную погрешность СИ – составляющую погрешности измерения, возникающую дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального значения или вследствие ее выхода за нормальный диапазон значений [55]. Дополнительную погрешность принято приводить на единицу изменения влияющей величины, например, “процентов на градус температуры”.

Помимо диапазона измерений, для СИ радиационных характеристик указывают тип и диапазон энергии регистрируемого ионизирующего излучения.

Для радиометрических средств измерения указывают чувствительность СИ или эффективность регистрации. Чувствительность представляет собой вероятность регистрации факта распада определенного радионуклида в источнике. Эффективность регистрации – вероятность регистрации кванта ионизирующего излучения определенной энергии, рожденного в источнике. Понятие чувствительности используют для радиометров, не обладающих

возможностью разделения излучения различных радионуклидов по энергии и применяющихся, как правило, для исследований мононуклидных источников. Понятие эффективности регистрации используют для радиометров, построенных на базе спектрометров, позволяющих выделять излучение отдельных радионуклидов в виде пиков на аппаратном спектре гамма- или альфа- излучения и измерять активность каждого из радионуклидов в отдельности.

Для спектрометров указывают дифференциальную и интегральную нелинейность. И та, и другая величина характеризуют отклонение функции преобразования от прямой линии и являются составляющими основной погрешности измерения энергии квантов ионизирующего излучения. Интегральная нелинейность представляет собой предельное отклонение гладкой функции (как правило, полинома более высокого порядка), которой может быть аппроксимирована функция преобразования от линейной функции. Выделение интегральной нелинейности в виде отдельной составляющей позволяет оценить, какая часть основной погрешности измерения энергии квантов ионизирующего излучения может быть учтена (компенсирована) за счет введения нелинейных моделей аппроксимации энергетической шкалы спектрометра. Дифференциальная нелинейность представляет собой соответствующую характеристику амплитудно-цифрового преобразователя [56], преобразующего амплитуду электрических импульсов в числовой код – номер канала.

Для дозиметров принято дополнительно указывать энергетическую зависимость чувствительности, представляющую собой изменение погрешности измерения дозы или мощности дозы, возникающую при изменении энергии квантов ионизирующего излучения. Является ли эта составляющая погрешности дополнительной или уже учтена в основной погрешности СИ можно определить из декларируемой области применения дозиметра. Энергетическая зависимость чувствительности является определяющей составляющей погрешности измерения для дозиметров

гамма-излучения, в которых для регистрации используется сцинтилляционный детектор или счетчик Гейгера. Напротив, дозиметры на основе ионизационных камер позволяют измерять мощность дозы и дозу с хорошей точностью благодаря низкой энергетической зависимости чувствительности.

В Российской Федерации для измерений, входящих в Сферы государственного регулирования, разрешается использовать только оборудование, которое внесено в Государственный реестр СИ [57]. Процедуры проверки и экспертизы, проводимые при внесении СИ в Государственный реестр призваны обеспечить метрологическую прослеживаемость результатов измерений к соответствующим эталонам измеряемых величин.

5.3. Основные методы регистрации ионизирующих излучений

Функционирование средств измерений ионизирующих излучений основано на преобразовании энергии, потраченной ионизирующим излучением на ионизацию, в регистрируемые величины – ток, электрические импульсы, изменения структуры вещества детектора [58, 59]. В зависимости от способа преобразования различают следующие методы регистрации ионизирующих излучений: ионизационный, сцинтилляционный, люминесцентный, трековый.

5.3.1. Ионизационный метод

Это метод основан на изменении электрической проводимости рабочего тела детектора, вследствие образования в нем под действием ионизирующего излучения носителей заряда. Для измерения ионизационного эффекта рабочее тело детектора помещают в электрическое поле, которое препятствует рекомбинации ионов и придает им направленное движение к соответствующим электродам. Под воздействием электрического поля возникает направленное движение заряженных частиц - так называемый ионизационный ток, сила которого зависит от приложенного к электродам

напряжения и электрического заряда, образовавшегося между ними.

В качестве детекторов используют газонаполненные камеры и полупроводниковые детекторы. В зависимости от способа включения и регистрируемой величины (ток или количество электрических импульсов) газонаполненные камеры разделяют на ионизационные камеры (ИК), газоразрядные счетчики Гейгера—Мюллера (СГМ), пропорциональные счетчики (ПС).

Ионизационная камера представляет собой детектор, в котором электрический ток определяется только тем зарядом, который возник вследствие ионизации рабочего тела ионизирующим излучением. При отсутствии источника излучения газ между пластинами является изолятором и ток через рабочее тело камеры не проходит. При прохождении заряженной частицы через межэлектродное пространство происходит ионизация газа. Образовавшиеся ионы под воздействием приложенного напряжения перемещаются к электродам – в цепи протекает электрический ток.

Различают два режима работы ионизационной камеры: токовый и импульсный. Токовые камеры измеряют средний ионизационный ток, образуемый совокупным потоком излучения, импульсные камеры регистрируют отдельные заряженные частицы и фотоны, попадающие в рабочий объем камеры. Энергетическое разрешение лучших образцов ионизационных импульсных камер достигает 15-20 кэВ.

В зависимости от формы электродов ИК подразделяются на цилиндрические, плоские и сферические.

Газоразрядные счетчики Гейгера—Мюллера – это разновидность ионизационной камеры, в которой происходит лавинное усиление заряда до предельно-возможных для этой камеры значений. Обычно в СГМ разреженный газ располагается внутри трубки, вдоль оси которой располагается проволочный анод, а на некотором расстоянии от него – цилиндрический катод. При прохождении через детектор заряженная частица ионизирует газ, при этом образующиеся электроны, двигаясь к аноду,

попадают в электрическое поле, напряженность которого увеличивается при приближении к проволочному аноду, что приводит к вторичной ионизации. Это приводит к образованию коронного разряда в газе. Применяются специальные способы для гашения разряда. Благодаря этому формируется импульс ограниченной продолжительности и амплитуды. Этого достаточно для фиксации факта прохождения единичной частицы, однако не позволяет определить её энергию.

Пропорциональные счетчик – это разновидность ионизационной камеры, в которой происходит лавинное усиление заряда до значений, пропорциональных изначально образовавшемуся заряду. ПС имеет такую же конструкцию, как и СГМ. В объеме счетчика также происходит вторичная ионизация и создаются электрические лавины, что приводит к многократному усилению тока ионизации, созданной регистрируемой частицей. Однако, за счет подбора состава газовой смеси и напряжения питания, коронного разряда не происходит. Таким образом, пропорциональный счетчик регистрирует ионизацию, пропорциональную энергии первичной частицы, что позволяет определять ее энергию.

Для регистрации альфа- и бета-частиц используют преимущественно торцовые счетчики. Один из торцов корпуса счетчика закрывают тонкой пленкой из слюды или полимерной пленки толщиной 1–5 мг/см².

Для спектрометрии бета-, гамма- и рентгеновского излучений малых энергий применяют пропорциональные детекторы с газовым усилением. Поскольку источник излучения обычно находится вне детектора, должна учитываться потеря энергии частицей во входном окне детектора.

Одним из показателей качества счетчиков является его эффективность – отношение количества зарегистрированных счетчиком частиц к числу входящих в него частиц. Обычно эффективность счетчиков по отношению к гамма-квантам составляет доли процента, а по отношению к альфа- и бета-частицам – от нескольких до десятков процентов.

При измерении источников малой активности используют

разновидность газовых ионизационных детекторов – проточные пропорциональные счетчики. Измеряемая проба помещается внутрь счетчика, и в рабочий объем непрерывно подается газ.

Полупроводниковые детекторы (ППД). Плотность вещества чувствительного объема в полупроводнике примерно на три порядка выше плотности газа в ионизационной камере, а энергия образования пары носителей на порядок ниже. ППД обладают самой высокой чувствительностью относительно других типов ионизационных детекторов и незначительно уступают по этому параметру сцинтилляционным детекторам. Вследствие низкой энергии образования пары носителей количество таких пар относительно велико, вследствие чего уменьшается статистическая неопределенность амплитуды электрического сигнала на выходе, и, как следствие, – улучшается энергетическое разрешение детектора. В настоящее время ППД занимают ведущее положение в области спектрометрических измерений. Высокая разрешающая способность ППД обеспечивает проведение прецизионных спектрометрических измерений.

Для регистрации гамма-излучения используются преимущественно детекторы на основе высокочистого германия и кремния. Коаксиальные детекторы в алюминиевом корпусе позволяют регистрировать гамма-излучение с энергией от 30 кэВ, а планарные детекторы в корпусе с окном из бериллия или углеродо-содержащего пластика) – от 5 кэВ. Для уменьшения электрических шумов и достижения лучшего энергетического разрешения эксплуатация ППД на основе особо-чистого германия осуществляются при температуре жидкого азота.

ППД для спектрометрии альфа-излучения имеют толщину чувствительного слоя 25-200 мкм и площадь рабочей поверхности от десятков до нескольких тысяч мм². Лучшие образцы детекторов имеют разрешение порядка 20-30 кэВ для альфа-частиц с энергией 5 МэВ.

ППД, используемые для регистрации бета-излучения, имеют толщину чувствительного слоя от долей миллиметра у поверхностно-барьерных

кремниевых детекторов до нескольких миллиметров у литий-кремниевых детекторов. Этого недостаточно для полноценной бета-спектрометрии – пробег бета частиц отдельных радионуклидов (например, ^{214}Bi) больше толщины чувствительного слоя. По этой причине, а также вследствие непрерывности спектров бета-излучения, затрудняющей, а в ряде случаев и исключающей возможность идентификации радионуклидного состава по спектру бета-излучения, полупроводниковые детекторы бета-излучения используют обычно в радиометрическом режиме для измерений суммарной бета-активности или активности мононуклидных источников.

5.3.2. Сцинтилляционный метод

В основе сцинтилляционного метода измерения ионизирующих излучений лежит явление люминесценции (холодного свечения вещества).

При попадании частицы излучения в вещество сцинтиллятора происходит ионизация и возбуждение атомов. При переходе атомов из возбужденного в основное состояние высвечивается энергия в виде вспышек света (сцинтилляций), которые могут быть зарегистрированы. Визуальная регистрация сцинтилляций практически невозможна – для того, чтобы заметить наиболее сильные сцинтилляции, возникающие под воздействием альфа-частиц в сернистом цинке, глаз должен адаптироваться в темноте в течение нескольких часов⁴. Поэтому, для регистрации сцинтилляций применяют фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), с помощью которого образовавшиеся при сцинтилляции фотоны превращаются в электрический сигнал (импульс электрического тока).

От веществ, которые применяются в качестве сцинтилляторов, требуется, чтобы они обладали высоким сечением взаимодействия с ионизирующим излучением, были прозрачны для собственного излучения, давали интенсивные вспышки в диапазоне длин волн фотонного излучения, соответствующем максимуму спектральной чувствительности ФЭУ и имели

⁴ Но так открыт был эффект сцинтилляции

короткое время высвечивания.

По химическому составу сцинтилляторы подразделяют на неорганические и органические, а по агрегатному состоянию – на твердые, жидкие и газовые. Из неорганических сцинтилляторов для регистрации бета- и гамма-излучения используют йодистый натрий (калий), активированный таллием – NaI(Tl), KI(Tl), йодистый цезий, активированный таллием или натрием CsI(Tl), CsI(Na); для регистрации альфа-излучений – сернистый цинк, активированный серебром – ZnS(Ag). Для регистрации гамма-излучения применяют также сернистый кадмий, активированный серебром – CdS(Ag) вольфрамат кадмия – CdWO₄, а также бромид лантана LaBr₃, характеризующийся наилучшим энергетическим разрешением среди сцинтилляторов.

Основной областью применения неорганических сцинтилляционных детекторов на основе монокристаллов NaI(Tl) и CsI(Tl) является гамма-спектрометрия и прикладные радиометрические измерения. Высокая эффективность регистрации гамма-излучения и простота обслуживания делает эти детекторы основным инструментом для решения радиоэкологических задач и регистрации даже незначительно превышающих фоновое излучение потоков частиц.

Сцинтилляционные неорганические детекторы уступают по энергетическому разрешению полупроводниковым детекторам, однако, использование вычислительной техники и современного программного обеспечения позволяет надежно идентифицировать радионуклиды и измерять их активность в смесях из 5-7 радионуклидов.

Эффективный атомный номер материала неорганических сцинтилляторов существенно отличается от соответствующего параметра биологической ткани, вследствие чего энергетическая зависимость чувствительности дозиметров, выполненных на базе неорганических сцинтилляционных кристаллов NaI(Tl) и CsI(Tl) оказывается существенной.

Из органических веществ наибольшее распространение для

использования в качестве сцинтилляторов получили: антрацен ($C_{14}H_{10}$), нафталин ($C_{10}H_8$), стильбен ($C_{14}H_{12}$), некоторые виды пластмасс и других веществ. Органические сцинтилляторы излучают в основном в ультрафиолетовом диапазоне. Поэтому для возможности наблюдать вспышки в видимом спектральном диапазоне органические сцинтилляторы обычно готовят из смеси нескольких компонентов. Первичные центры флуоресценции возбуждаются за счет энергии заряженных частиц и излучают фотоны ультрафиолетового диапазона. Второй компонент поглощает первично испущенные фотоны и переизлучает поглощенную энергию в виде фотонов видимого света.

Органические пластические сцинтилляторы получили широкое распространение для детектирования гамма- и бета-излучения. Они имеют ряд преимуществ перед неорганическими сцинтилляторами: малое время высвечивания, прозрачность, возможность обеспечения высокой эффективности регистрации благодаря большому объему и практически любой конфигурации, простота изготовления. Основным недостатком органических сцинтилляторов всех видов являются их худшее энергетическое разрешение по сравнению с неорганическими сцинтилляторами.

Существенной особенностью, определяющей место органических сцинтилляторов в задачах радиационного контроля, является малый эффективный атомный номер вещества сцинтиллятора. Это исключает возможность использования органических сцинтилляторов для спектрометрии гамма-излучения – вероятность фотоэффекта для них на порядки меньше вероятности комптоновского взаимодействия (сечение фотоэффекта пропорционально z^5 (1.11), а сечение комптон-эффекта - z), вследствие чего на аппаратурном спектре отсутствуют пики полного поглощения гамма-квантов. С другой стороны, отличие атомного номера вещества органического сцинтиллятора от биологической ткани не столь существенно, как для неорганических сцинтилляторов. Вследствие этого

энергетическая зависимость чувствительности дозиметра, использующего для детектирования излучения органический сцинтиллятор, оказывается не столь существенной и, как правило, составляет 20 – 30 % в диапазоне энергий 50-3000 кэВ. Этим обусловлено широкое использование органических сцинтилляторов в полевых многофункциональных средствах измерения, совмещающих функции поискового прибора и дозиметра.

Жидкие сцинтилляторы являются раствором сцинтиллирующего вещества в органическом растворителе. Жидкие сцинтилляторы эффективно и широко используют для регистрации бета-излучений. Бета-излучатели непосредственно вводят в состав сцинтиллирующего раствора. Жидкие сцинтилляторы получили широкое распространение в задачах измерения активности радионуклидов с низкой энергией бета-излучения – ^{14}C и ^3H .

Одной из важных характеристик сцинтилляционных детекторов является время высвечивания – время, в течение которого поглощенная в сцинтилляторе энергия частицы конвертируется в световой импульс. Типичное время высвечивания неорганических сцинтилляторов – от десятков наносекунд до десятков микросекунд. Органические сцинтилляторы (пластиковые и жидкие) высвечиваются в течение наносекунд.

Для регистрации альфа-излучения широко используется сцинтиллятор $\text{ZnS}(\text{Ag})$, представляющий собой порошок белого цвета, который фиксируют на прозрачной или отражающей подложке. Для измерений низких ($10^{-2} - 10^{-3}$ Бк/л) концентраций альфа-излучающих радионуклидов сконцентрированные посредством упаривания образцы смешивают с порошком сернистого цинка. Непрозрачность этого сцинтиллятора не позволяет использовать его в спектрометрических задачах.

Для спектрометрии и радиометрии альфа-излучения применяют тонкие (порядка сотен мкм) кристаллы CsI . Такие сцинтилляторы представляют собой тонкие пластины, наклеенные на пластиковую или стеклянную подложку.

В последнее время получили развитие оксидные и фторидные

наносцинтилляторы, особенности структурных и светоизлучательных характеристик которых открывают перспективы их применения в задачах радиационной медицины.

5.3.3. Люминесцентный метод

В дозиметрии ионизирующих излучений получили распространение несколько методов, основанных на изменении структуры вещества под воздействием ионизирующих излучений, с последующим считыванием этих изменений посредством люминесценции.

Сущность явления заключается в том, что образованные в люминофоре под действием ионизирующего излучения носители заряда (электроны и дырки) локализуются в центрах захвата, в результате чего происходит накопление поглощенной энергии, которая затем освобождается при дополнительном воздействии освещении люминофора ультрафиолетовым излучением определенной длины волны, либо нагреве. Наблюдаемое при этом свечение – люминесценция - служит мерой поглощенной энергии.

По типу дополнительного воздействия различают эффекты фотолюминесценции и термолюминесценции.

Фотолюминесценция - люминесценция, возникшая в результате действия ионизирующего излучения с последующим облучением световым потоком. В качестве детекторов излучения, как правило, используются неорганические материалы, активированные серебром (метафосфатные стекла): NaCl–Ag, KCl–Ag, CaSO₄–Mn и др. Чувствительность дозиметров определяется концентрацией серебра и видом других компонентов. Максимальный уровень радиофотолюминесценции наблюдается при содержании 1–2% серебра. Пределы измерения этих детекторов от нескольких мГр до 10⁶ Гр.

Термолюминесценция - явление свечения ранее облученного ионизирующим излучением вещества при его нагревании. При плавном повышении температуры твердых органических веществ до нескольких сотен градусов, предварительно облученных заряженными частицами или гамма-

излучением, температуры максимумов радиотермолюминесценции соответствуют температурам структурных переходов. Спектр термолюминесценция определяется энергетической структурой ионизированных центров свечения. Световая энергия (световыход) пропорциональна энергии, переданной образцу этого вещества, т.е. дозе излучения.

В настоящее время для практического применения используют термолюминесцентные дозиметры (ТЛД) на основе детекторов нескольких типов, каждый из которых имеет свои особенности, а их выбор определяется следующими основными требованиями: чувствительностью детектора только к ионизирующему излучению, линейной зависимостью выхода люминесценции от дозы облучения, отсутствием затухания в широком диапазоне температур, малой зависимостью чувствительности от мощности дозы и энергии ионизирующих излучений, оптимальной стоимостью при массовом применении.

5.3.4. Трековый метод

Метод измерения плотноионизирующих излучений основан на использовании диэлектрических трековых детекторов (ДТД). ДТД избирательно регистрируют плотноионизирующие частицы (альфа-частицы, тяжелые ионы, осколки деления), и, в то же время, нечувствительны к бета-частицам и гамма-квантам.

Заряженные частицы, проходя через диэлектрик, теряют часть или всю свою энергию, производя радиационные нарушения в структуре вещества. В результате вдоль траектории образуется область, в которой находится вещество с измененной структурой, обладающее, как правило, повышенной химической реактивностью. Эту область называют латентным (скрытым) треком. Он может быть обнаружен при помощи электронного микроскопа или другими методами. Благодаря отсутствию в диэлектриках свободных электронов, область латентного трека является довольно стабильной и, в зависимости от состава материала, температуры и влажности среды,

сохраняется без изменений в течение нескольких суток, месяцев или даже многих лет. Для выявления треков, под которым подразумевается любая процедура, обеспечивающая увеличение латентного трека до размеров, видимых в оптический микроскоп, разработано несколько методов. Наиболее распространенным является метод избирательного химического травления диэлектрика с латентными треками специально подобранными химическими реагентами, что приводит к образованию вдоль траекторий частиц пустотелых конических или цилиндрических каналов, уходящих от поверхности вглубь материала. Это и есть выявленные треки.

К настоящему времени развито несколько методов наблюдения и счёта треков, имеющих свои достоинства и недостатки, в том числе автоматизирующих эти процессы [60].

Однако, основным и наиболее распространённым методом наблюдения и измерения треков является оптический с помощью микроскопа. Он является наиболее информативным, так как позволяет не только посчитать количество треков, но и измерить их геометрические параметры, по которым могут быть определены энергия, заряд и другие характеристики частиц, обусловивших образование треков. Однако, в ситуациях, когда достаточно измерить только количество треков, зарегистрированных детектором, например, при измерении ОА радона, целесообразно использовать метод электроискрового счёта.

Поверхностная плотность треков на экспонированном детекторе пропорциональна значению экспозиции $Q \cdot t$, где Q – поверхностная плотность потока ионизирующих частиц; t – интервал времени, в течение которого производилось экспонирование детектора.

В ДТД определенного типа при принятых методах химической обработки и счёта треков могут быть измерены (зарегистрированы) лишь частицы в определенном интервале их энергий. Нижняя граница этого интервала определяется тем, что энергия частицы должна быть достаточна для образования обнаруживаемого трека (при использовании

электроискрового счета – для образования сквозного трека в тонком детекторе), а верхняя – порогом регистрации детектора (при больших энергиях частиц ее потери энергии на входе в детектор недостаточны для выявления трека).

Проиллюстрируем это положение на примере альфа-частиц, эмитируемых основными радионуклидами семейств ^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U . Энергии альфа-частиц, испускаемых при радиоактивном распаде, лежат в интервалах: долгоживущие нуклиды урана – 3,7–5,0 МэВ; ДПР радона – 5,5–6,0 МэВ; долгоживущие нуклиды семейства тория – 4,0–5,5 МэВ; ДПР радона и торона – 6,3–7,9 МэВ. Интервал энергий альфа-частиц, регистрируемых детектором из нитроцеллюлозной пленки толщиной 12 мкм при нормальном падении частиц на детектор и при обычно используемых режимах травления составляю 1,9–4,0 МэВ. Поэтому, при экспонировании детектора для увеличения эффективности регистрации альфа-частиц, в общем случае, на регистрирующую поверхность ДТД накладывают полимерную пленку, играющую роль поглотителя энергии. Так, лавсановая пленка толщиной 12 мкм смещает энергетический интервал регистрации в область 4,0–5,8 МэВ, а толщиной 20 мкм – в область 5,0–6,2 МэВ. При наклонном падении частиц интервал регистрации сужается.

ДТД являются пороговыми, то есть каждый тип детектора регистрирует заряженные частицы, для которых ЛПЭ вдоль трека превышает некоторое минимальное для данного типа детектора значение. Так, регистрация протонов низких энергий возможна лишь в наиболее чувствительных детекторах на основе модифицированного полимерного материала CR-39 (полиаллилдигликолькарбонат; выпускается фирмами Pershore, American Acrylics, MOM и др.). Регистрация альфа-частиц возможна, помимо CR-39, в трековых детекторах на основе нитроцеллюлозных пленок CN-85 и LR-115. В пленках на основе лавсана и поликарбоната протоны и альфа-частицы не регистрируются, но возможна избирательная регистрация осколков деления.

В качестве примера, ниже представлен ряд параметров, характеризующих трековый детектор LR-115 Type II, представляющий собой слой нитроцеллюлозы (чувствительный слой толщиной 12,8 мкм), нанесенный на поверхность лавсановой или иной основы, удерживаемый на ней за счет сил адгезии.

Линейный диапазон измеряемых значений плотности треков:

- на ТД 20-4000 трек/см²;
- эффективность регистрации в 2π-геометрии 0,2 трек./α-част;
- интервал энергий α-частиц (при нормальном падении на ТД).

Регистрируемых с вероятностью 100%, МэВ:

- ДТД без поглотителя 1,9 - 4,0;
- ДТД с поглотителем из лавсановой пленки толщиной 12 мкм (4,0 - 5,8);
- ДТД с поглотителем из лавсановой пленки толщиной 20 мкм (5,0 - 6,2);
- уровень собственного фона детектора не превышает 10 трек/см²;
- минимально-измеряемый уровень α-загрязнения поверхности;
- с погрешностью 2σ при доверительной вероятности P=0,95 при длительности экспонирования ДТД 1 сутки 0,1 част/(см²мин).

Основные инструментальные составляющие погрешности измерений:

- наклон счетной характеристики на 100 В не превышает 6%;
- нелинейность градуировочной характеристики не превышает 5%;
- СКО результатов измерений в цикле считывания не превышает 3%;
- случайная составляющая погрешности значений активности не превышает 10%.

Высокое зарядовое и пространственное разрешение, возможность избирательной регистрации частиц в заданном зарядово-энергетическом интервале путем подбора материала детектора и условий выявления и обнаружения треков, низкая чувствительность к слабоионизирующим

излучениям, возможность использовать детекторы практически неограниченной площади и любой конфигурации обусловили использование трековых детекторов для решения многих задач:

- измерение суммарной альфа-активности плоских счетных образцов и других твердых поверхностей;
- исследование поверхностного и пространственного распределения радионуклидов;
- измерения ОА радона.

Совокупность регистрационных характеристик ДТД, включая возможность проведения непрерывных пассивных измерений в течение от одного до нескольких месяцев, определяет особое место детекторов этого типа для проведения широкомасштабных мониторинговых радоновых измерений, в частности, - для получения среднего за длительные интервалы времени значения ОА радона в помещениях.

Важным преимуществом ТД является их высокая чувствительность, обусловленная возможностью многократного увеличения времени экспонирования пробы на детекторе. При этом процесс экспонирования может идти параллельно на десятках и даже сотнях проб. Одновременная обработка всех детекторов существенно уменьшает трудоемкость и длительность анализа в пересчете на один счетный образец. Высокая чувствительность ТД позволяет упростить процесс пробоподготовки, поскольку снижаются требования к степени концентрирования исследуемого радионуклида.

Трековый метод измерения суммарной альфа-активности проб заключается в измерении активности плоского счетного образца, приготовленного из анализируемой пробы. Метод основан на прямо пропорциональной зависимости количества треков на трековом детекторе, зарегистрированных в процессе его экспонирования на поверхности образца, от удельной активности пробы в предположении, что все радионуклиды (или известная их часть), содержащиеся в исходной массе пробы, переходят в

счетный образец. Пробег альфа-частиц в веществе счетного образца, как и в веществе детектора, весьма ограничен, обычно не более 70 мкм, поэтому увеличение толщины измеряемого слоя до значений, превышающих 70 мкм, не приводит к уменьшению минимально-измеряемой активности данным детектором.

Методика измерений суммарной альфа-активности счетных образцов, основанная на трековом методе, сводится к осуществлению следующих процедур: отбор пробы необходимой массы или объема; обработка пробы и приготовление твердого плоского счетного образца; экспонирование детектора на поверхности счетного образца; химическая обработка детектора (травление) для выявления зарегистрированных треков; счет количества треков на детекторе; расчет активности исследуемого образца.

Трековый метод измерения альфа-активности позволяет получить минимально-измеряемое значение суммарной альфа-активности счетного образца на уровне не более 0,005 Бк.

Измерение с использованием полимерных ДТД включает в себя следующие этапы:

- подготовка детектора необходимого размера;
- закрепление его на обследуемом объекте и снятие его после экспонирования;
- химическая обработка детектора;
- измерение количества треков, зарегистрированных на детекторе;
- расчёт определяемой величины.

6. ОРГАНИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ПО РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКЕ НА ТЕРРИТОРИЯХ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ДОБЫЧИ УРАНОВЫХ РУД (НА БАЗЕ РАЗРАБОТАННОЙ ИАС ПИИИ)

6.1. Основные информационные ресурсы об облучении населения РФ

Оценка уровней радиационного воздействия природных источников ионизирующих излучений на население возможна только на основе многолетних, территориально масштабных обследований с аккумуляцией результатов в информационно-аналитических ресурсах. В нашей стране такими ресурсами являются федеральный банк данных по облучению населения РФ, части которого базируются в ФБУН СПб НИИРГ им. Рамзаева⁵ и ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна и база данных информационно-аналитической системы по природным источникам ионизирующих излучений (ИАС ПИИИ) ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России.

Важной особенностью федерального банка данных ФБУН СПб НИИРГ им. Рамзаева (сведения по всем субъектам Российской Федерации) и ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна (сведения по закрытым административным территориальным образованиям) является постоянное пополнение данных. В этот процесс включены лаборатории радиационного контроля Роспотребнадзора, ФМБА России и других ведомств, финансируемые преимущественно из средств государственного бюджета.

Информация в банк данных ФБУН СПб НИИРГ им. Рамзаева поставляется лабораториями радиационного контроля (ЛРК) посредством заполнения и отправки в федеральный центр годовой формы государственного статистического наблюдения формы № 4-ДОЗ «Сведения о

⁵ Постановление Правительства Российской Федерации от 16.06.1997 № 718 «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан». [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 718 of 16.06.1997 "On the procedure for establishing a unified state system for monitoring and recording individual doses to citizens". – Moscow, JSC "Kodex" (in Russian).]

дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона” [61]. Форма предусматривает передачу данных о дозах внешнего (за счет космического и техногенно-измененного радиационного фона) и внутреннего (за счет облучения естественными и техногенными РН, содержащимися в воздухе, пищевых продуктах и воде) облучения. Отличительной особенностью системы сбора данных посредством форм № 4-ДОЗ является перенос ответственности за представительность выборки данных и соответствие ее структуры реальным характеристикам потребления исследуемого продукта населением, на измерительные лаборатории. Передаваемые данные содержат уже результаты статистического анализа и оценки доз облучения и не включают данные, необходимые для исследования и оптимизации условий облучения – зависимости результатов измерений от тех или иных особенностей объектов контроля (способа вентиляции, отопления, этажности здания, типа источника водоснабжения, систем очистки воды на водозаборных скважинах и т.п.). Такой подход практически исключает возможность повторного использования результатов измерений для расчетов с другими условиями облучения, например, при изменении этажности строительства, модернизации детских учебных учреждений и др.

База данных ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна содержит результаты измерений радиационных характеристик мест проживания, работы и источников водоснабжения, а также территорий, прилегающих к предприятиям добычи или переработки урановых руд в закрытых административных территориальных образованиях.

В ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России на протяжении более 20 лет ведется Федеральный банк данных (ФБД) ФМБА России, в котором во исполнение Постановления Правительства РФ от 28 января 1997 г. № 93 [62] собирается информация, получаемая из межрегиональных управлений (МРУ) ФМБА России в рамках радиационно-гигиенической

паспортизации организаций и территорий. В объем радиационного контроля (РК) входят:

- контроль суммарной объемной альфа- и (или) бета-активности, а также контроль активности радионуклидов Sr-90, Cs-137, I-131, Ra-226, H-3 в пробах атмосферного воздуха, Бк/м³;
- контроль удельной активности радионуклидов Sr-90, Cs-137, I-131, Ra-226, а также суммарной альфа- и (или) бета-активности в воде, Бк/л;
- контроль удельной активности долгоживущих радионуклидов Sr-90, Cs-137 в пищевых продуктах, выращенных в СЗЗ РОО и потребляемых местным населением, Бк/кг;
- контроль мощности дозы гамма-излучения, измеряемой на высоте 1 м над поверхностью земли (МАЭД), мЗв/ч.

Дополнительно на РОО контролируется (суммарная) годовая индивидуальная доза внешнего и внутреннего облучения персонала, мЗв. Количественные значения РК на РОО (промплощадка, СЗЗ, ЗН) измеряются на регулярной основе дозиметрическими службами ведомств, к которым относится данный РОО, согласно принятому ведомственному регламенту и накапливаются в ведомственных системах контроля РО; в МРУ ФМБА России передаются усредненные и максимальные значения за прошедший год.

База данных ИАС ПИИИ, в отличие от названных банков данных, содержит в основном результаты интегральных измерений концентрации радона в помещениях населенных пунктов субъектов РФ и ЗАТО, полученные сотрудниками ФГУП НТЦ РХБГ в рамках выборочных обследований населенных пунктов. Структура модернизированной ИАС ПИИИ позволяет хранить и анализировать данные и об активности радионуклидов в других типах контролируемых объектов – воде, почве, строительных материалах, а также мощности дозы в помещении. Структура сохраняемых в базе данных ИАС ПИИИ данных содержит расширенную информацию о каждом объекте исследований и условиях выполнения

измерений, необходимую как для выполнения различных дозиметрических оценок, так и для целей геологических и климатических исследований. Относительно меньший объем данных в базе данных ИАС ПИИИ (~20000 результатов измерений ОА радона) компенсируется использованием интегральных методов измерений и детализацией информации об обследуемом объекте, позволяющей повторно использовать результаты обследований, проведенных в различные годы, для формирования статистических выборок и дозиметрических оценок.

В дальнейшем, рассмотрение структуры системы хранения и анализа данных будет проводиться на примере базы данных ИАС ПИИИ.

6.2. Организация системы хранения данных по радиационной обстановке на примере ИАС ПИИИ

Основным назначением программных средств является обеспечение процессов сбора, хранения и отображения (включая публичное представление в сети интернет), данных об интенсивности природных источников ионизирующих излучений. При этом объектами контроля, как правило, являются:

- воздух жилых и производственных помещений;
- вода открытых и подземных источников водоснабжения;
- почва, участки местности, участки под застройку;
- строительные материалы;
- пищевые продукты.

Контролируемыми величинами при этом являются характеристики источников ионизирующего излучения (удельная или объемная активность радионуклидов, суммарная или эффективная активность) и характеристики полей ионизирующих излучений, создаваемых этими источниками (МАЭД).

Справочная информация об измерении должна обеспечивать возможность выполнения дозиметрических оценок, решения оптимизационных и исследовательских задач.

Структура базы данных и программные интерфейсы ИАС ПИИИ разрабатывались на основе принципов инвариантности по отношению к величинам, которые должны храниться и отображаться в системе, включая и отображение на карте. Таблицы базы данных позволяют сохранять различные структуры измерительной и справочной информации без изменения структуры базы данных, а также осуществлять поиск, выборку и статистический анализ данных в соответствии с настраиваемыми пользователем критериями. Инвариантность по отношению к сохраняемым измерительным величинам и структурам справочной информации достигается за счет комбинации реляционных (табличных) и документно ориентированных принципов организации базы данных.

В качестве СУБД используется база данных PostgreSQL, в основе которой лежит реляционная организация данных, позволяющая проводить индексацию и быстрый поиск информации, а документоориентированность обеспечивается за счет наличия полей типа JSONB, позволяющих сохранять произвольные древовидные структуры данных и выполнять поиск по их элементам.

В основе базы данных лежит таблица с перечнем измеряемых величин. Каждая измеряемая величина содержит название, обозначение, единицы измерения и список возможных синонимов названий и обозначений. Для каждой измеряемой величины задается две структуры справочной информации:

- Разбиение диапазона возможных значений величины на интервалы (до 8 интервалов), которое впоследствии используется для построения распределений или цветового отображения данных в отчетных формах;

- Состав возможных полей справочной информации (включая тип данных, единицы измерения, синонимы и обозначения), необходимый для однозначной расшифровки, вводимой в базу данных справочной информации об измерении.

Таблица с результатами измерений содержит ссылку на измеряемую величину, значение результата измерений, неопределенность, ссылку на запись с информацией о времени и месте измерений и ссылку на запись со справочной информацией об измерении. Справочная информация об измерении представляет собой JSON структуру именованных полей интерпретация и расшифровка которой производится в соответствии со списком полей справочной информации, определенном для измеряемой величины.

База данных также содержит ряд вспомогательных таблиц, необходимых для ускорения процедур статистического анализа и отображения данных. Таковыми являются таблицы, содержащие результаты статистического анализа данных (количество результатов, среднее значение, сумму квадратов) для каждой измеряемой величины в каждом интервале значений согласно разбиению диапазона возможных значений величины на интервалы для трех уровней территориального деления: на уровне областей, районов и населенных пунктов.

6.3. Организация программных средств хранения и анализа данных на примере ИАС ПИИИ

Программное обеспечение средств хранения и анализа данных имеет трехуровневую архитектуру. На нижнем уровне находится система управления базами данных PostgreSQL, которая обеспечивает процесс сохранения и поиска данных на диске. Система управления базами данных не обладает информацией о логике структур сохраняемых данных и их взаимосвязях.

На среднем уровне расположены Web-сервисы. Эта часть программного обеспечения принимает запросы от клиентских программ и пользователей и возвращает данные в виде ответов. Web-сервисы интегрируют в себе более 10 контроллеров, поддерживающих порядка сотни типов запросов. Web-сервисы обеспечивают взаимодействие как для минимальных структур данных, соответствующих полям или записям таблиц

СУБД, так и для логически связанных цельных структур данных, добавление или удаление которых требует изменений в нескольких таблицах базы данных.

Взаимодействие клиентских программ с Web-сервисами ведется посредством TCP-IP протокола. Клиентская программа в запросе (типа GET, PUT или DELETE) указывает имя контроллера, имя функции этого контроллера и значения параметров, необходимых для выполнения функции. В ответ контроллер возвращает данные в виде JSON структуры, текста или html-документа. На уровне Web-сервисов реализованы:

- контроллеры, имена которых совпадают с именами таблиц базы данных. Каждый из этих контроллеров обеспечивает взаимодействие с соответствующей таблицей – функции добавления, изменения, поиска и удаления записей таблицы или их частей. Контроллеры, связанные с отдельными таблицами, не заботятся о целостности структур данных и об отражении изменений в смежных таблицах, связанных с изменяемой таблицей бизнес-логикой;

- контроллер NRDB. Функции данного контроллера используются для сохранения или извлечения из нескольких таблиц больших структур данных, связанных бизнес-логикой. Функции сохранения и удаления обеспечивают целостность данных – при добавлении результатов измерений изменяется не только таблица с результатами, но и смежные таблицы со статистической информацией по регионам (количество измерений, средние значения, распределения по интервалам);

- контроллер ADMIN. Этот контроллер реализует ряд функций, необходимых для создания или изменения шаблонов структур данных – добавление или изменение измеряемой величины, состава справочной информации, разбиения диапазона возможных значений величины на контрольные интервалы и т.п.;

- контроллер USER – обеспечивает функции работы с пользователями – добавление, удаление, редактирование данных.

На верхнем уровне программного обеспечения находятся клиентские программы, предоставляющие пользователю интерфейс для взаимодействия с Web-сервисами. В системе ИАС ПИИИ реализована одна клиентская программа – это сайт, страницы которого загружаются в браузер и который отображает данные в виде значков на карте или в виде отчетов, представляющих данные в виде таблиц, графиков и гистограмм. Помимо функций представления результатов измерений сайт обеспечивает отображение ряда статических страниц со справочными или нормативными документами.

Для авторизованных и обладающих соответствующими правами пользователей на сайте реализованы страницы, обеспечивающие взаимодействие отдельных участников измерительного процесса при сборе, проверке и сохранении измерительной информации. Порции измерительной информации, представляющей собой, как правило, несколько десятков результатов однотипных измерений, готовятся и проверяются в виде отдельного документа - паспорта измерений, который доступен на сайте всем участникам. По окончании подготовки документа он загружается в базу данных посредством функций контроллера NRDB.

6.4. Структуры справочной информации об измерении

Структура справочной информации об измерении и список возможных измеряемых величин различны для различных объектов измерений. Ниже, в таблицах приведен состав полей справочной информации и измеряемых величин, сохраняемый в базе данных ИАС ПИИИ для точек местности, источников водозабора и жилых или общественных помещений.

Таблица 20 – Состав параметров справочной и измерительной информации, характеризующей точки местности:

Имя	Возможные синонимы	Тип данных	Комментарий
Date	Дата	Дата	Дата отбора
Region	Субъект (территориальный)	Строка	Край, область, регион

City	Населенный пункт	Строка	Населенный пункт
Street	Улица	Строка	Улица
House	Дом	Строка	Дом
Building	Корпус	Строка	Корпус
Latitude	Широта	Число	Широта
Longitude	Долгота	Число	Долгота
Object	Участок	строка	Наименование участка
TerritoryType	Зона	Строка из списка: "промышленная", "селитебная", "селитебная низкоэтажная", "селитебная высокоэтажная", "селитебная низко/высокоэтажная", "полоса отвода дорог", "пустырь", "сельхозугодья", "поля", "луга", "лес".	Тип (зона) территории
Relief	Рельеф	Строка из списка: "равнинный", "плоскогорье", "горный", "холмы", "долины"	Рельеф местности
GumusHeight		Положительное число	Толщина плодородного слоя, см
UnderGumus		Строка из списка: "песок", "суглинок", "глина", "дресва", "галька", "крупнообломочный", "ил", "торф", "техногенный грунт".	Тип грунта под плодородным слоем
Flora		Строка из списка: "отсутствует", "полевой", "луговой", "болотный", "лесная подстилка".	Растительный покров
SampleHeight		Положительное число	Глубина отбора пробы, см
WtrPhase	Фаза, Фаза режима	Строка из списка: "половодье", "паводок", "летняя межень", "зимняя межень", "ледостав", "ледоход", "засуха", "затяжные дожди".	Фаза водного режима

Comment	Коментарий	Строка	Коментарий
MeasMethod	Метод измерения	Строка	Метод измерения
RnFlux		Число	Плотность потока радона, мБк/м ² с
U(RnFlux)		Число	Расширенная неопределенность плотности потока радона, мБк/м ² с
²²⁶ Ra		Число	Удельная активность ²²⁶ Ra, Бк/кг
U(²²⁶ Ra)		Число	Расширенная неопределенность активности ²²⁶ Ra, Бк/кг
²³² Th		Число	Удельная активность ²³² Th, Бк/кг
U(²³² Th)		Число	Расширенная неопределенность активности ²³² Th, Бк/кг
⁴⁰ K		Число	Удельная активность ⁴⁰ K, Бк/кг
U(⁴⁰ K)		Число	Расширенная неопределенность активности ⁴⁰ K, Бк/кг
H10	МАЭД, мкЗв/ч	Число	МАЭД, мкЗв/ч

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Справочнике обобщены основные материалы, касающиеся радиоэкологических аспектов добычи и переработки урановых руд. Дана характеристика урана и урановых руд, способов добычи урана, источников загрязнения окружающей среды и путей поступления радионуклидов в организм человека. Описана нормативно-методическая база, методы и средства измерений, применяемые при радиоэкологическом мониторинге мест добычи урановых руд. Проведенный сбор и систематизация данных по местам прошлой и планируемой добычи урановых руд из открытых источников, позволяет сделать вывод, что радиоэкологические проблемы и дозы облучения населения наиболее значимы в районах с наиболее хорошо развитой инфраструктурой и высокой плотностью населения, а именно, Стрельцовский (Приаргунский) и Зауральский рудные районы. Вместе с тем, условия залегания и способы добычи руд в этих районах существенно различаются. В Стрельцовском районе урановые руды преимущественно залегают близко к поверхности земли, и их разработка велась и до сих пор ведется шахтным способом с образованием отвалов, хвостохранилища и соответствующим существенным воздействием на окружающую среду. Стрельцовский рудный район является одним из наиболее старых горнопромышленных районов. Близкое залегание горных пород с повышенным содержанием урана и радия обуславливает формирование высоких концентраций радона в домах города Краснокаменска. На территории месторождения ранее располагался поселок Октябрьский, характеризующийся одними из наиболее высоких концентраций радона в домах не только в России, но и в мире. Впоследствии жители поселка были переселены, а дома снесены. В Зауральском рудном районе разработка урановых месторождений началась относительно недавно. Урановые руды на всех месторождениях залегают на значительной глубине, и разработка их ведется методом подземного скважинного выщелачивания. Это обуславливает относительно незначительную экологическую нагрузку на

окружающую среду в ходе разработки урановых руд при условии строгого соблюдения технологий.

Витимский рудный район характеризуется значительно меньшей развитостью инфраструктуры и практически отсутствием населенных пунктов, кроме нескольких небольших селений и вахтовых рабочих поселков. На большей части территории района присутствует бронирующий базальтовый покров, изолирующий урановые руды и горные породы с повышенными содержаниями радионуклидов, в результате чего в природных условиях поступление радионуклидов в окружающую среду невелико. Оно также сохранится на приемлемом уровне, в случае если разработка месторождений методом подземного скважинного выщелачивания будет производиться без нарушения технологий с учетом всех требований экологического законодательства.

Перспективный Эльконский рудный район расположен на еще не вполне освоенных территориях Южной Якутии, однако, неглубокое залегание урановых руд и относительная близость таких регионально значимых населенных пунктов, как города Алдан и Томмот, обуславливают актуальность проведения экологических исследований в этом районе.

Материалы, собранные в справочнике, призваны способствовать реализации соответствующими специалистами исследований и разработок в области долговременного радиоэкологического мониторинга в местах добычи урановых руд. В перспективе это позволит усовершенствовать методологию мониторинга и адаптировать методы для целей аккумуляции данных в ИАС ПИИИ. Таким образом, представленные справочные данные будут способствовать решению одной из наиболее важных проблем обеспечения безопасности населения и окружающей среды в части, касающейся радиационной защиты населения и предотвращения загрязнения окружающей среды в зоне действия предприятий по добыче и переработке урановых руд. Результаты ориентированы на следующие области деятельности: радиационная безопасность и гигиена, обеспечение

экологического благополучия населения и окружающей среды, организация и проведение комплексного мониторинга окружающей среды, методы и средства радиационных измерений, базы данных и геоинформационные системы. Проведение комплексного мониторинга территории имеет и важное социальное значение, т.к. предотвращает опасения населения, часто необоснованные и чрезмерные, относительно радиационного загрязнения окружающей среды. Кроме того, наличие этой информации делает предприятия более защищенными от необоснованных обвинений в чрезмерном воздействии на окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Уран (элемент). Википедия. - URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Уран> (дата обращения 15.05.2023).
- 2 Изотопы: свойства, получение, применение. В 2 т / Под ред. В. Ю. Баранова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — Т. 2.
- 3 Уран. Физические свойства- URL: <https://chem.ru/uran> (дата обращения 15.05.2023).
- 4 Audi G., Bersillon O., Blachot J., Wapstra A. H. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties // Nuclear Physics A. — 2003. — Т. 729. — С. 3—128.
- 5 Барковский А. Н. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 г //Радиационная гигиена. – 2021. – Т. 14. – №. 4. – С. 103-113.
- 6 Мясоедов Б. Ф., Раков Э. Г. Уран // Химическая энциклопедия: в 5 т. / Гл. ред. Н. С. Зефирова. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. — Т. 5: Триптофан — Ятрохимия. — С. 41—43. — 783 с.
- 7 Тарханов А.В.1, Бугриева Е.П.Современное состояние мировой и российской урановой промышленности разведка и охрана недр // Труды Пятого Международного симпозиума «Уран: геология, ресурсы, производство». М.: ФГБУ «ВИМС», 2021. — С. 32 — 40.
- 8 World Nuclear Association - URL: <https://www.world-nuclear.org/>(дата обращения 15.05.2023).
- 9 Тарханов А. В. Современные тенденции развития мировой и российской урановой промышленности (2007-2012 гг.)// Тезисы Третьего международного симпозиума геология, ресурсы, производство» – М.: ФГУП «ВИМС», 2013,С. 153-154.
- 10 Нигматулин, Б.И. Атомная энергия между прошлым и будущим /Б.И. Нигматулин. - URL: <http://proatom.ru> (дата обращения 16.05.2023)

- 11 Шумилин М.В. Уран: итоги и открытия нового века.) // Тезисы Третьего международного симпозиума геология, ресурсы, производство» – М.: ФГУП «ВИМС», 2013, С. 174-175.
- 12 Бойцов, А.В. Состояние и перспективы развития добычи урана за рубежом. Доклад на НТС-3 ГК «Росатом» / А.В. Бойцов. — М., 2019.
- 13 Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах»
- 14 Святецкий, В. С. Уранодобывающая отрасль России: состояние и перспективы развития / В. С. Святецкий, С. В. Полонянкина, А. Г. Ермаков // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 11. – С. 22-26.
- 15 АО «Хиагда» - URL: <https://khiagda.armz.ru/ru/kompaniya/novosti/> (дата обращения 15.05.2023).
- 16 Машковцев Г. А., Константинов А.К., Мигута А.К. и др. Уран Российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.
- 17 Машковцев Г.А., Мигута А.К., Наумов С.С. Перспективы освоения Эльконского урановорудного района // Разведка и охрана недр. – 2007. - № 6. – Стр. 11-20. (Рис. 2, 3, стр. 14)
- 18 Казанский В. И., Максимов Е. П. Геологическая позиция и история формирования Эльконского урановорудного района (Алданский щит, Россия) //Геология рудных месторождений. – 2000. – Т. 42. – №. 3. – С. 211-230.
- 19 Готман Я. Д., Полякова В. М., Мигута А. К. О новой разновидности браннерита //Докл. АН СССР. – 1968. – Т. 179.
- 20 Готман Я. Д. и др. Об изменениях браннеритовой минерализации в гидротермальных рудопроявлениях //Izvestiia Akademii nauk SSSR. Otdelenie matematicheskikh i estestvennykh nauk. Seriiâ geologicheskaiâ. – 1972. – №. 6. – С. 84.
- 21 Бойцов В. Е., Пилипенко Г. Н. Золото и уран в мезозойских гидротермальных месторождениях Центрального Алдана (Россия) //Геология рудных месторождений. – 1998. – Т. 40. – №. 4. – С. 354-369.

22 Основы экологической безопасности (радионуклиды и тяжелые металлы) в Алданском районе Республики Саха (Якутия) / А. П. Чевычелов, П. И. Собакин, А. Н. Горохов, Л. И. Кузнецова // География и краеведение в Якутии и сопредельных территориях Сибири и Дальнего Востока : Материалы II Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию Якутской Автономной Советской Социалистической Республики (ЯАССР), Якутск, 25–26 марта 2022 года / Редколлегия: Л.С. Пахомова, А.Н. Саввинова, О.М. Кривошапкина, Т.П. Трофимова. – Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2022. – С. 114-119.

23 СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.

24 Сизова А. О. и др. Исследования экологической обстановки в предпроектный период освоения уранового месторождения //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №. 5. – С. 392-406.

25 Ищукова Л. П., Модников И. С., Сычев И. В. Урановые рудообразующие системы областей континентального вулканизма //Геология рудных месторождений. – 1991. – Т. 33. – №. 3. – С. 16-25.

26 Шаткова Л. Н., Шатков Г. А. О возможном источнике рудного вещества урано-флюоритовых месторождений //Геология рудных м-ний. – 1973. – №. 4. – С. 36-43.

27 Радиозэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». Под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. — М., 2021. — 555 с.

28 Шандала Н.К., Семенова М.П., Исаев Д.В., Киселев С.М., Серегин В.А., Титов А.В., Филонова А.А., Журавлева Л.А., Маренный А.М. Радиозэкологическая обстановка в районе расположения Приаргунского производственного горно-химического объединения // Гигиена и санитария. 2014. Т. 93. № 4. С. 14-18

29 Маренный А.М., Киселёв С.М., Титов А.В., Золотухина С.Б., Астафуров В.И., Дмитриев В.А., Журавлёва Л.А., Маренный М.А., Нефедов Н.А., Пенезев А.В., Хохлова Е.А.. Обследование города Краснокаменск на содержание радона в помещениях // Радиационная гигиена, т.6, № 3, 2013, с.47 – 52.

30 Ширапова С.Д. Радиогеоэкология таёжно-мерзлотных ландшафтов Витимского плоскогорья (на примере Хиагдинского месторождения урана). Диссер. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Бурятский гос. университет. Улан-Удэ, 2005.

31 Отчёт по экологической безопасности АО «Хиагда» 2021

32 Домаренко В. А., Краморенко С. В., Чернев Е. М. Поведение урана и радия при формировании руд месторождения Дыбрын (Витимский урановорудный район, республика Бурятия) // Благородные, редкие и радиоактивные элементы в рудообразующих системах. К 120-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР, профессора Феликса Николаевича Шахова сборник статей Всероссийской научной конференции с международным участием, 28 - 30 октября 2014 г., г. Новосибирск: / Российская академия наук (РАН), Сибирское отделение (СО), Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева. — Новосибирск : Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014.

33 Ширапова С.Д. Радиогеоэкология таежно-мерзлотных ландшафтов витимского плоскогорья// Фундаментальные исследования. 2005. № 3. С. 73.

34 Отчет по экологической безопасности за 2018 год АО «Далур». - URL: http://www.dalur.armz.ru/images/File/dalur/2019/dalur_ecology_report (дата обращения 02.09.2023)

35 Отчет по Экологической Безопасности за 2020 год АО «Далур». - URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2021/ecology_report (дата обращения 02.09.2023)

36 И.Н. Солодов. Защищенность подземных вод от глубинного источника загрязнения при отработке уранового месторождения добровольного сернокислотным скважинным подземным выщелачиванием (курганская область)// Траектория исследований – человек, природа, технологии. Выпуск 1(1), 2022. С. 26-38

37 Завьялова О.Г. Несоответствие официальной и общественной оценок радиационного загрязнения территорий уранодобычи в Курганской области//В сборнике: Национальные экосистемы. сборник научных трудов по итогам проведения I-III Международных научно-практических конференций. Курган, 2023. С. 851-858.

38 Булавин А. В., Савицкий А. В. Основные особенности внутреннего строения зон СРД // Новое в изучении минерально-сырьевых ресурсов Мурманской области. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1989.

39 Мельник Н.А., Икконен П.В. Радиоактивность некоторых горных пород восточной части Карельского кратона//Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2010. № 7. С. 146-150.

40 Месторождения полезных ископаемых Средняя Падма. - URL: <https://catalogmineralov.ru/deposit/597> (дата обращения 02.09.2023).

41 Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005, 110 стр.

42 Бойко В. И. Ядерный топливный цикл и режим нераспространения/Бойко ВИ, Демянюк ДГ, Исаченко ДС //Издательство Томского политехнического университета. – 2009. – С. 6-7.

43 Атомная энергия. Том 70, вып. 5. — 1991 — Электронная библиотека «История Росатома». - URL: biblioatom.ru (дата обращения 02.09.2023).

44 Брошюра «Мониторинг здоровья населения и состояния окружающей среды в районах бывших урановых производств в Центральной Азии» из-во ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, 2019

45 Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 24.12.2010 № 171. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 27.01.2011, регистрационный № 19587. Введены взамен СП 2.6.1.1292-03 и СанПиН 2.6.1.2750-10 «Изменения и дополнения 1 к СП 2.6.1.1292-03».

46 Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный № 18115. Введены взамен СП 2.6.1.799-99 «ОСПОРБ-99».

47 СП 502.1325800.2021. Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ: свод правил. – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2021.

48 СП 321.1325800.2017. Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадионной защиты. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018 г.

49 МУ 2.6.1.2713-10 Радиационный контроль и гигиеническая оценка источников питьевого водоснабжения и питьевой воды по показателям радиационной безопасности. Оптимизация защитных мероприятий источников питьевого водоснабжения с повышенным содержанием радионуклидов. 2010. Изменение 1 к МУ 2.6.1.1981-05 (Источник: ИСС "ТЕХЭКСПЕРТ")

50 UNSCEAR, 2008. Sources and effects of ionizing radiation. Volume I: sources. Report to the general assembly scientific annexes A and B. (UNSCEAR

2008 Report) United Nations publication, New York (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Comp. by: M. Bhuvanewari Stage: Revises1 Chapter No.: 3 Title Name: Schroeyers. Date:2/5/17. Time: 18:37:07. Page Number: 36 Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction B978-0-08-102009-8.00003-7, 00003 Schroeyers.

51 Крисюк Э.М. Эффективная удельная активность природных радионуклидов в материалах. АНРИ. 2001. №4(27). С.4-8.

52 ГОСТ 8.010-2013 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики выполнения измерений. Основные положения (с Изменением N 1)

53 ГОСТ 8.638-2013 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения (с Поправкой)

54 Маренный А. М. и др. Система мотивированного сбора информации о содержании радона в помещениях с участием населения //Радиационная гигиена. – 2022. – Т. 15. – №. 1. – С. 96-103.

55 РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения

56 ГОСТ 29109-91 (МЭК 748-4-87) Приборы полупроводниковые. Микросхемы интегральные. Часть 4. Интерфейсные интегральные схемы

57 Утверждённые типы средств измерений - URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (дата обращения 15.08.2023)

58 Болоздыня А. И., Ободовский И. М. Детекторы ионизирующих частиц и излучений. Принципы и применения. – 2012.

59 Брегадзе Ю. И., Степанов Э. К., Ярына В. П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. – 1990.

60 Маренный А. М. Диэлектрические трековые детекторы в радиационно-физическом и радиобиологическом эксперименте. – Энергоатомиздат, 1987.

61 Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (форма N 4-ДОЗ)

62 Постановление Правительства РФ от 28 января 1997 г. N 93 "О порядке разработки радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий" (с изменениями и дополнениями) - URL: <https://base.garant.ru/2133150/> (дата обращения 15.08.2023)

Поступление загрязняющих веществ в окружающую среду от предприятий,
по добыче и переработке урановой руды.

(раздел подготовлен по опубликованным отчетам по экологической
обстановке на предприятиях ГК « Росатом»).

Предприятия ПАО "ППГХО им. Е.П. Славского», АО «Далур» и АО «Хиагда» и осуществляют регламентируемые сбросы в водоёмы хозяйственно-бытового назначения и выбросы в атмосферный воздух, являясь источниками поступления загрязняющих веществ в окружающую среду. В настоящем разделе рассмотрены материалы выбросов и сбросов загрязняющих веществ в процессе производственной деятельности данных предприятий. Источником информации являются официальные экологические отчёты предприятий ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» (за период 2015-2021 гг.), АО «Далур» (2010-2021 гг.), АО «Хиагда» (2012-2021 гг.) [1-29].

Перечень регламентированных загрязняющих веществ в сбросах и выбросах предприятий представлен в таблицах 1-2. Подробные данные по динамике сбросов и выбросов представлены в Приложении.

Сбросы в водоёмы хозяйственно-бытового назначения

Качественный состав сбросов со сточными водами представлен в таблице А.1.

Таблица А.1– Качественный состав загрязняющих веществ, сбрасываемых со сточными водами ПАО "ППГХО им. Е.П. Славского" в 2015-2021 гг. [1-29]

Предприятие	Химические вещества					Радионуклиды
	Класс опасности					
	н	1	2	3	4	
ПАО "ППГХО им. Е.П. Славского"	БПК*, Взвешенные вещества **, Кальций, Нефтепродукты, СПАВ	Уран	Кадмий, Нитриты	Железо, Магний, Марганец, Молибден, Нитраты, Фосфаты, Цинк	Аммоний, Сульфаты, Хлориды	Сбросы не производятся
Примечания:						
*БПК – биологическое потребление кислорода – массовая концентрация растворенного кислорода, потребленного при определенных условиях (обычно в течение 5 суток, БПК ₅) в процессе биологического окисления органических и/или неорганических веществ, содержащихся в воде (ISO 6107-9).						
**Взвешенные вещества – это вещества, выделенные из воды путем фильтрования или центрифугирования (ГОСТ 30813).						

Радионуклиды

Ни одно из рассматриваемых предприятий не осуществляет сбросов радионуклидов в окружающую среду.

Химические вещества

Сбросы химических веществ осуществляет только ПАО "ППГХО им. Е.П. Славского".

На настоящий момент основную долю сбросов составляют загрязнители IV класса опасности, а именно сульфаты и хлориды – $1,29 \cdot 10^3$ и 296 т за 2021 год соответственно. Их доля составляет более 50% по массе от общих сбросов за 2021 г. Кроме того, более 30% по массе от общих сбросов за 2021 г. составляют загрязнители общего действия - кальций и взвешенные вещества (626 и 370 т за 2021 год соответственно).

На рис. 1 представлена динамика сбросов со сточными водами сульфатов за период с 2015 по 2021 гг. Наибольшее значение фактического сброса и вместе с тем наибольшее превышение норматива зафиксировано в 2017 году. За последующие годы отмечается тенденция уменьшения сбросов в пределах установленных нормативов.

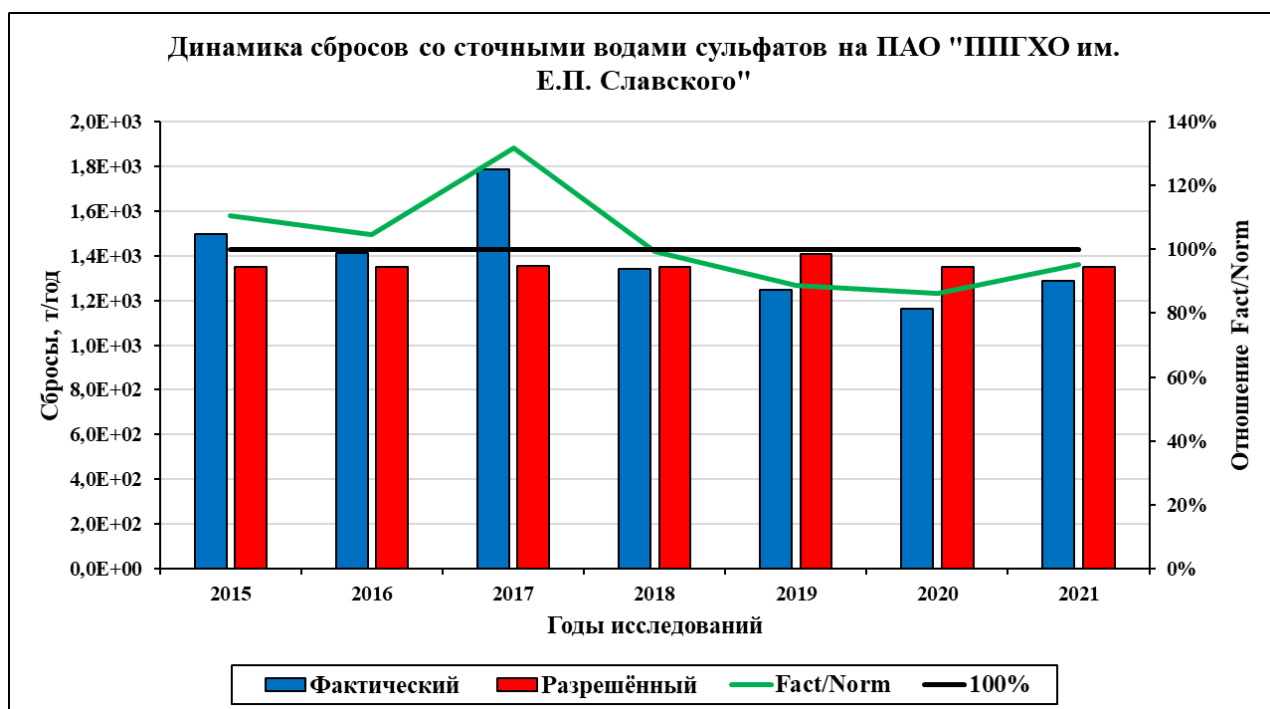


Рисунок А.1 – Диаграмма сбросов со сточными водами сульфатов на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

Для сбросов хлоридов со сточными водами наблюдались незначительные колебания, в пределах установленных нормативов (рисунок А.2.).



Рисунок А.2 – Диаграмма сбросов со сточными водами хлоридов на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

С 2017 года наблюдается тенденция увеличения сбросов кальция в гидрологическую сеть, при этом уровни сбросов не превышают (рисунок А.3.) допустимых значений.

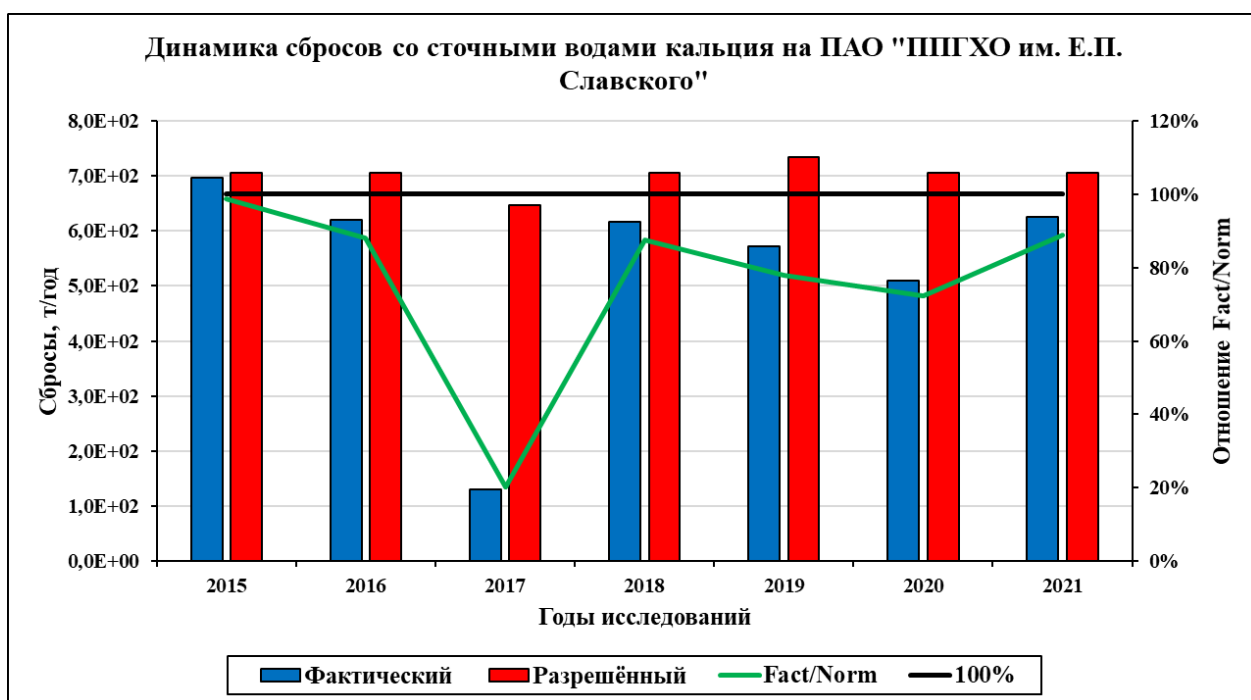


Рисунок А.3 – Диаграмма сбросов со сточными водами кальция на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

На рисунке А. 4 показана динамика сбросов взвешенных веществ. Сброс взвешенных веществ связан с процессами разрушения горных пород при взрыве и далее при уборке и транспортировке горной массы после проведения взрывных работ. Допустимый сброс взвешенных веществ был в разы (до 10 ПДС) превышен в течение нескольких лет до 2020 года. В 2020 г. нормативы были пересмотрены в сторону увеличения, однако и фактический сброс заметно сократился.



Рисунок А.4 – Диаграмма сбросов со сточными водами взвешенных веществ на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

Прочие загрязнители (20% по массе общих сбросов)

На рисунке А.5 и А.6 представлена динамика сбросов со сточными нитратов и нитритов. Концентрация нитратов и нитритов входит в число приоритетных показателей, определяемых при обследовании водных объектов и во многом определяют их экологическое и санитарное состояние. Повышенное содержание нитратов и нитритов в поверхностных водоёмах ведет к их зарастанию, так как азот, биогенный элемент, способствует

эвтрофикации⁶. Нитриты относятся ко II классу опасности, их предельно допустимые и фактические сбросы на порядок меньше показателей сбросов нитратов (III класс опасности). В то же время, превышений норматива не было зафиксировано для нитратов. Превышение допустимого сброса нитритов было выявлено в 2017 г., после этого их сброс сократился более чем в 2 раза (13,3 т/год против 5,46 т/год).

На ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» для нитритов характерна тенденция на снижение сбросов (с 8,38 т в 2015 году до 4,54 в 2021 году). Сбросы нитратов в окружающую среду стабильно составляют порядка 100 т ежегодно.



Рисунок А.5 – Диаграмма сбросов со сточными водами нитратов на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

⁶ Эвтрофикация водоемов – это естественный процесс, в результате которого происходит истощение кислорода в водоеме. Естественная эвтрофикация – это постепенный процесс, протекающий в течение длительного периода времени – даже столетий. Эвтрофикация водоемов связана с избытком питательных веществ, таких как фосфаты, собирающихся в водоемах, которые способствуют росту большого количества растений и водорослей. Источник: <https://ecoproverka.ru/evtrofikatsiya-vodoevov>

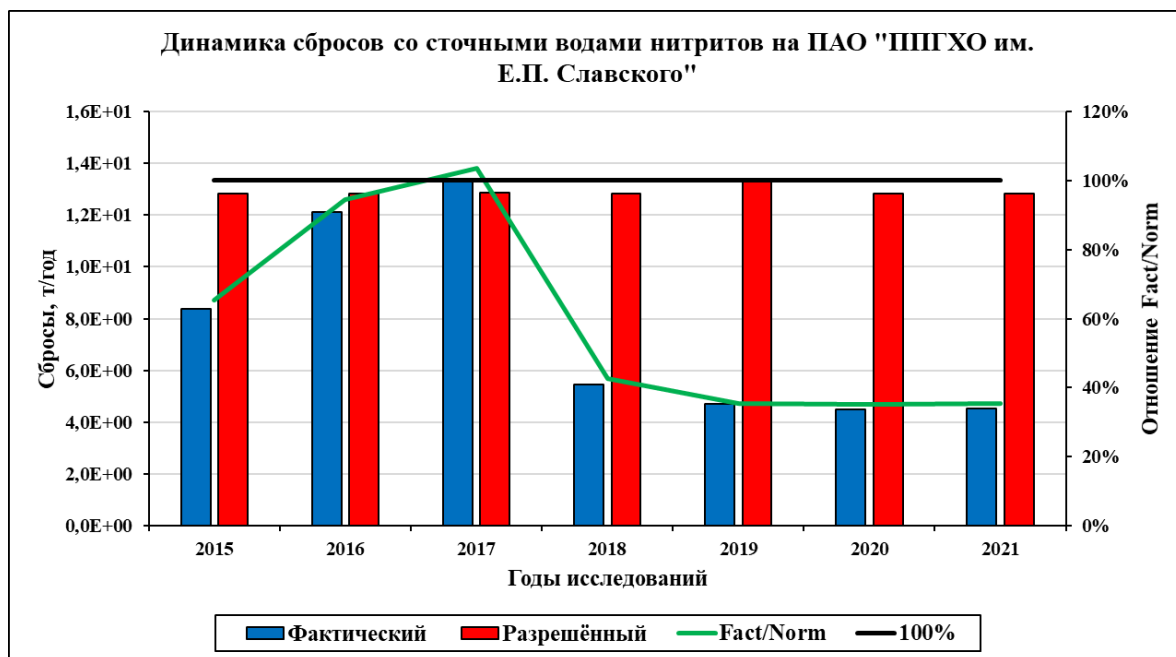


Рисунок А.6 – Диаграмма сбросов со сточными водами нитритов на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

Металлы (I-II класса опасности)

По урану превышений установленных нормативов не было выявлено, но с 2019 г. происходит постепенное увеличение сброса с 0,512 в 2015 году до 0,588 в 2021 году. (рисунок А.7).

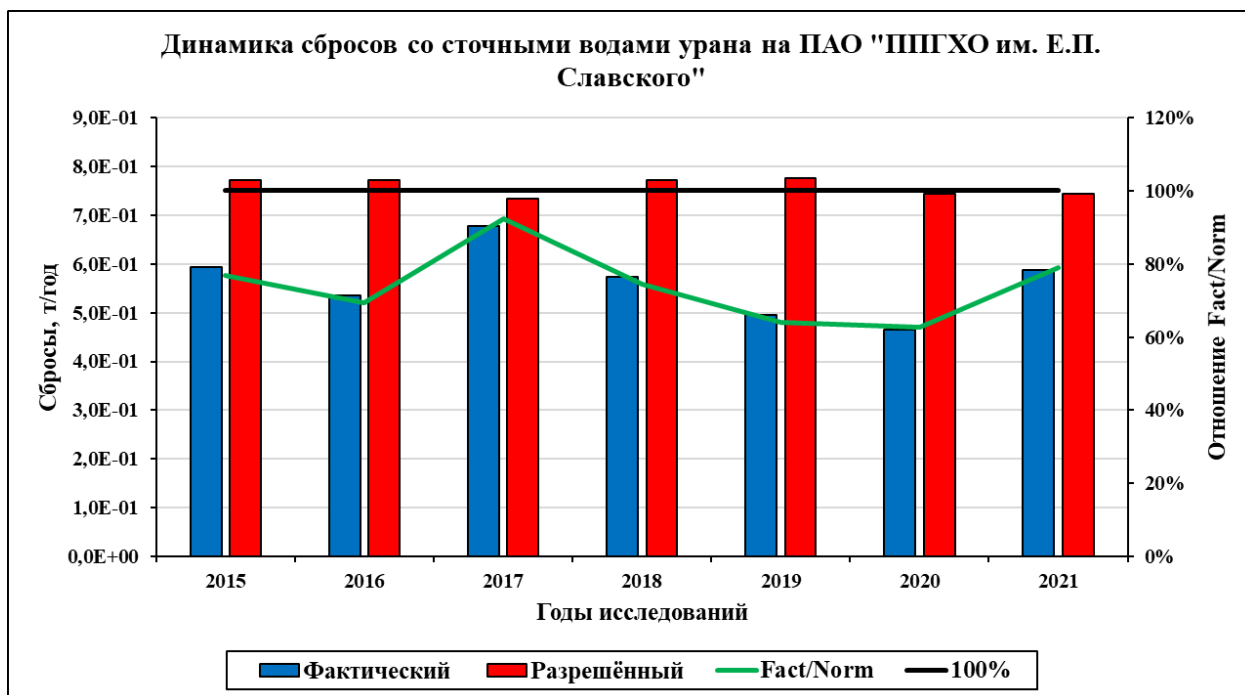


Рисунок А.7 – Диаграмма сбросов со сточными водами урана на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

За рассматриваемый период содержание кадмия в сбросах сточных вод ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» определялось в 2015 г. (рис. 8). По нему установлено превышение допустимого сброса в 3,5 раза ($5,00 \cdot 10^{-4}$ т), после чего мониторинг сбросов этого металла, относящегося к тяжёлым металлам II класса опасности, прекратился по непонятным причинам.

Металлы (III класс опасности)

Среди других веществ, сбрасываемых ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского», нормативы по магнию, молибдену, и цинку не были превышены за время исследования (диаграммы представлены на рис 7-П, 8-П, 15-П и 17-П (Приложение)). Для марганца и железа установленные пределы сбросов превышались с начала исследуемого периода до 2018 и 2019 гг. соответственно, после чего превышения были устранены отчасти за счёт снижения реального выброса, отчасти за счёт увеличения норматива.

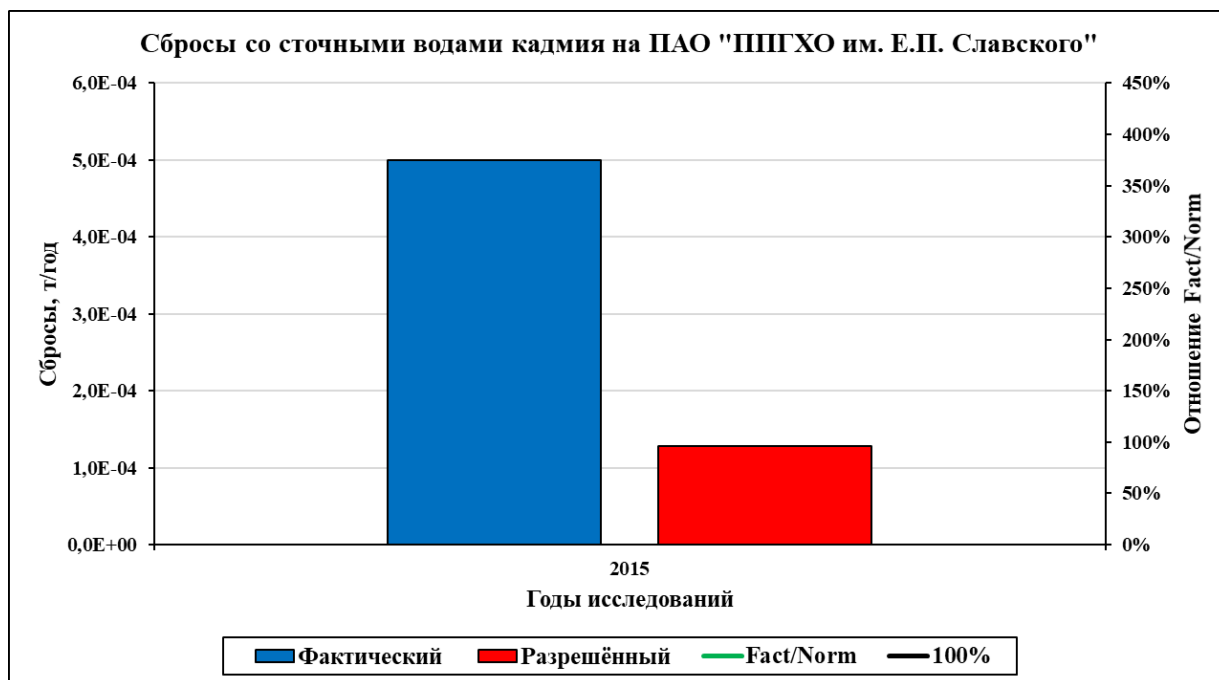


Рисунок А.8 – Диаграмма сбросов со сточными водами кадмия на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015 г.

Органические соединения (БПК, СПАВ, Нефтепродукты)

Динамика сбросов БПК представлена на рисунке А.9 БПК (биологическое потребление кислорода) – это массовая концентрация растворенного кислорода, потребленного при определенных условиях

(обычно в течение 5 суток, БПК5) в процессе биологического окисления органических и/или неорганических веществ, содержащихся в воде (ISO 6107-9). Параметр БПК является суммарным показателем степени загрязнённости отработанных вод, характеризующий их качественный и количественный состав по содержанию окисляемой органики и прочих веществ, обладающих восстановительными свойствами, содержащимися в сточных водах. За исследуемый период динамика сбросов была нестабильной. Нормативы пересматривались трижды: в сторону увеличения (2017 г.), затем снижения (2018 г.) и снова увеличения (2020 г.). Изменение фактических сбросов колебалось в меньшем диапазоне, и по показаниям с 2020 г. сбросы БПК со сточными водами не превышают нормативов (составляют около 50% от разрешённых значений).

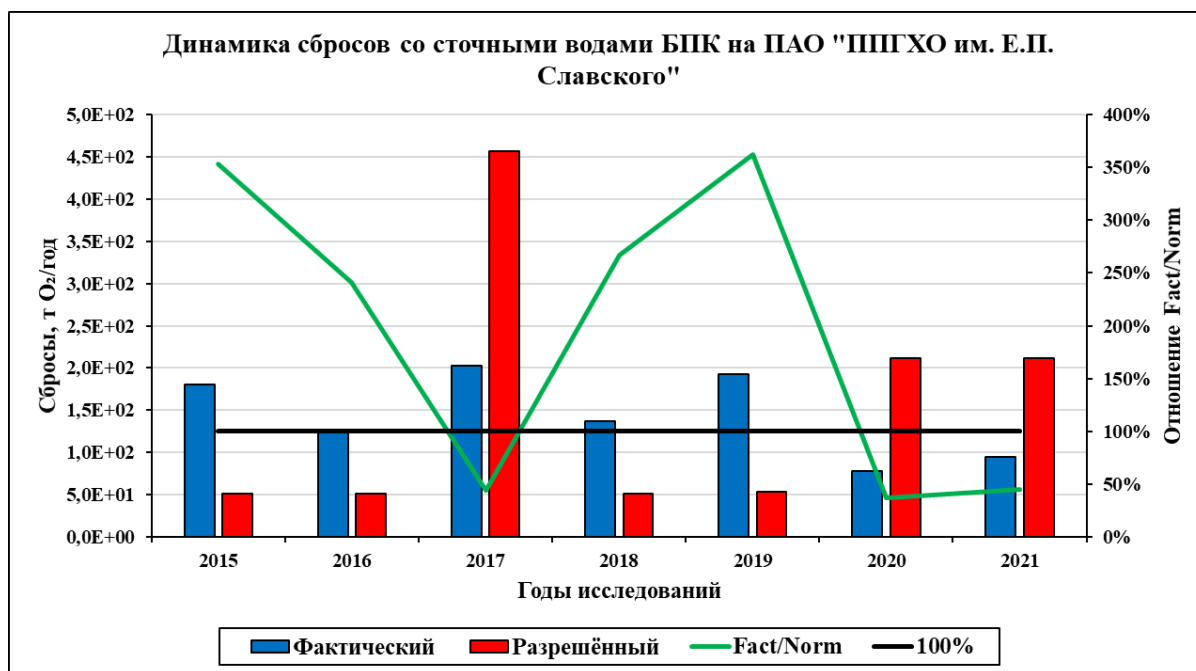


Рис.9 – Диаграмма сбросов со сточными водами БПК на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2016-2021 гг.

Для сбросов нефтепродуктов и СПАВ⁷ характерно непревышение установленных нормативов с небольшой тенденцией к снижению. Их динамика представлена на рисунке А.10 и А.11.

⁷ Синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), производимые на основе продуктов нефтеперерабатывающей промышленности, во многих отношениях превосходят мыла

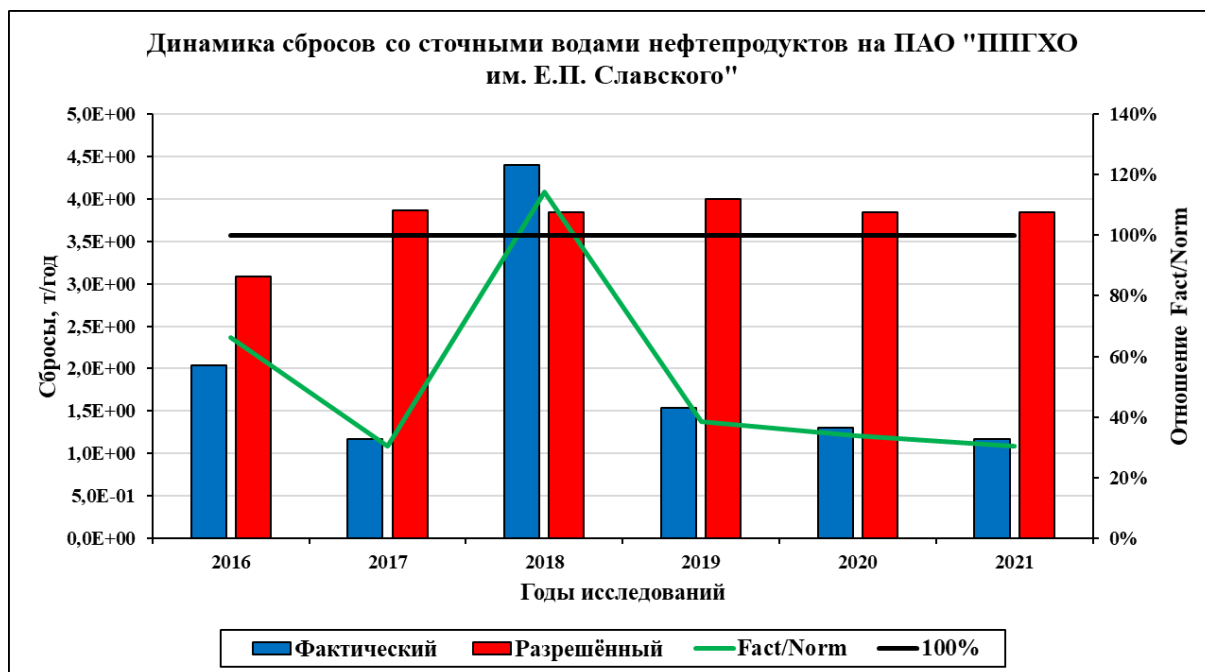


Рисунок А.10 – Диаграмма сбросов со сточными водами нефтепродуктов на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2016-2021 гг.

из жидких кислот и в настоящее время в ряде стран в значительной степени вытеснили последние. Эти вещества характеризуются лучшим сочетанием полезных свойств, чем твердые мыла из натуральных жиров и растительных масел, вследствие чего широко применяются в различных отраслях народного хозяйства и в быту. Синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ) - группа химических веществ, присутствие которых в синтетических веществах (СВ) наиболее опасно для водоемов и отрицательно сказывается на работе очистных сооружений.

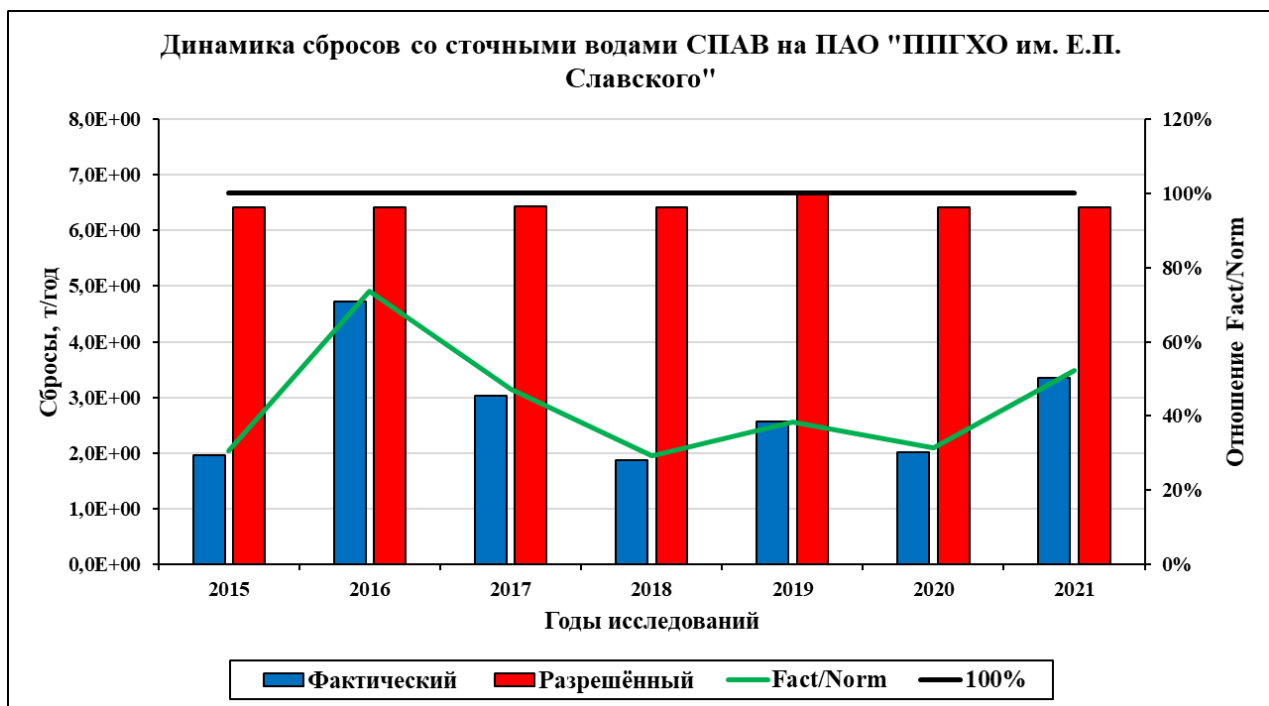


Рисунок А.11 – Диаграмма сбросов со сточными водами СПАВ на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

Выбросы в атмосферный воздух

На предприятиях ПАО "ППГХО им. Е.П. Славского", АО "Далур" и АО "Хиагда" осуществляются выбросы химических веществ и радионуклидов в атмосферный воздух. В таблице 2 представлен качественный состав атмосферных выбросов.

Химические вещества

Таблица А.2– Качественный состав загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух ПАО "ППГХО им. Е.П. Славского", АО "Далур" и АО "Хиагда"[1-29]

Предприятие	Химические вещества					Радионуклиды
	Класс опасности					
	н	1	2	3	4 (4э)	
ПАО "ППГХО им. Е.П. Славского"	Прочие вещества	-	Серная кислота	Серы диоксид, Пыль неорганическая (более 70 % SiO ₂), Азота оксиды (в пересчёте на NO ₂), Пыль	Углерода оксид	Долгоживущие радионуклиды, ²²² Rn, ²¹⁸ Po, ²¹⁴ Pb, ²¹⁴ Bi, ²³² Th, ⁴⁰ K

Предприятие	Химические вещества					Радионуклиды
	Класс опасности					
	н	1	2	3	4 (4э)	
				неорганическая (20-70 % SiO ₂)		
АО "Далур"	Прочие вещества	Бензапирен, Хрома триоксид	Марганец и его соединения, Серная кислота, Хлористый водород, Фториды газообразные (в пересчёте на HF), Фториды плохо растворимые	Азота диоксид, Азота оксид, Железа оксиды, Пыль неорганическая (более 70 % SiO ₂), Серы диоксид, Углерод (сажа)	Аммиак, Углерода оксид	Альфа-излучающие радионуклиды со средней активностью 4,4×10 ¹¹ Бк/год
АО "Хиагда"	Зола углей, Прочие вещества			Серы диоксид, Азота оксиды (в пересчёте на NO ₂), Углерод (сажа)	Углерода оксид	Альфа-излучающие радионуклиды со средней активностью 3,6×10 ¹⁰ Бк/год

Наибольшая масса выбросов в год осуществляется на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского». Основную долю загрязнителей составляют химические вещества III класса опасности (диоксид серы и неорганическая пыль с содержанием SiO₂ более 70 % – 5 600 т и 8 680 т за 2021 год соответственно для ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского»). В структуре выбросов АО «Далур» наибольшую часть занимают выбросы загрязняющих веществ IV (аммиак и оксид углерода – 0,735 и 0,148 т за 2021 год соответственно) и III (диоксид

азота 0,623 т за 2021 год) классов опасности. Для АО «Хиагда» наиболее значимым загрязнителем является диоксид серы (300 т за 2021 год), относящийся к III классу опасности. Таким образом, потенциальное загрязнение рассматриваемыми предприятиями атмосферного воздуха определяется в основном диоксидом серы и неорганической пылью.

Динамика атмосферных выбросов диоксида серы на предприятиях представлена на рисунках А.12-А.14. Наибольшие выбросы этого вещества в атмосферу производит ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» – порядка 1000 т/год. С 2015 г. у предприятия не было выявлено превышений допустимого выброса, притом, что в 2018 г. норматив был снижен на 30%.

Выбросы диоксида серы АО «Далур» составляют порядка 0,01 т/год – в 100 000 раз меньше выбросов ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского». Превышения нормативов здесь не было выявлено за весь период исследования, однако в 2015 г. разрешённый выброс в количественном отношении увеличился более чем на 200%.

В свою очередь, на АО «Хиагда» фактические выбросы диоксида серы увеличивались и превышали предельно допустимые значения с 2014 г. до 2017 г., когда был пересмотрен ПДВ в сторону увеличения (~ в 10 раз выше предыдущего значения). После повышения норматива, фактические выбросы диоксида серы также увеличились и стабильно составляют 99% от разрешённого выброса, а именно ~ 300 т/год.

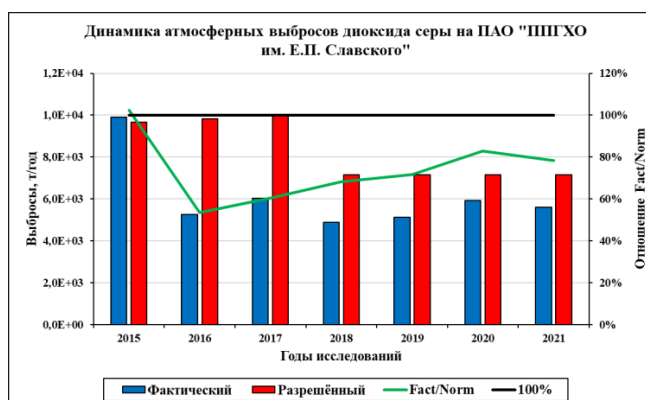


Рисунок А.12 - Диаграмма атмосферных выбросов диоксида серы на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

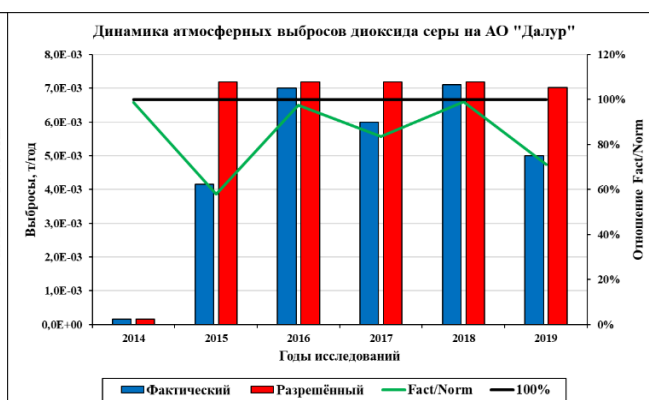


Рисунок А.13 - Диаграмма атмосферных выбросов диоксида серы на АО «Далур» за 2014-2019 гг.

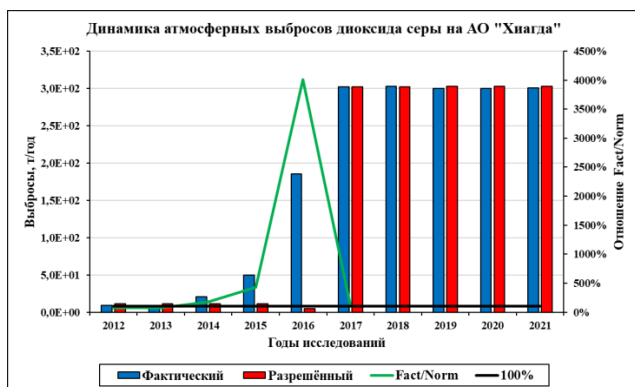


Рисунок А.14 - Диаграмма атмосферных выбросов диоксида серы на АО «Хиагда» за 2012-2021 гг.

Выбросы в атмосферный воздух серной кислоты, относящейся ко II классу опасности, за исследуемый период производили только ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» и АО «Далур». ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» предоставляет данные только за 2015 г., превышения норматива на тот момент выявлено не было, а фактический выброс составил 1,5 т/год. На АО «Далур» нормативы пересматривались дважды с 2013 г., оба раза в сторону уменьшения. В результате к 2021 г. фактический выброс составлял 0,009 т/год (в начале рассматриваемого периода было 0,5 т/год). Диаграммы представлены на рисунках А.15-А.16.



Рисунок А.15 - Диаграмма атмосферных выбросов серной кислоты на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015 г.



Рисунок А.16 - Диаграмма атмосферных выбросов серной кислоты на АО «Далур» за 2011-2021 гг.

По оксидам азота практически не было превышений нормативов ни на одном из рассматриваемых предприятий, хотя нормативы менялись. Единственное исключение – выбросы оксидов азота (в пересчёте на NO₂) на АО «Хиагда» в 2016 г., когда фактический выброс составил 127% от разрешенного. Норматив после этого был скорректирован и увеличен почти в

2 раза. Наибольшие значения выбросов оксидов азота характерны для ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» и составляют стабильно около 2000 т/год. Диаграммы представлены на рисунках А.17- А.20.

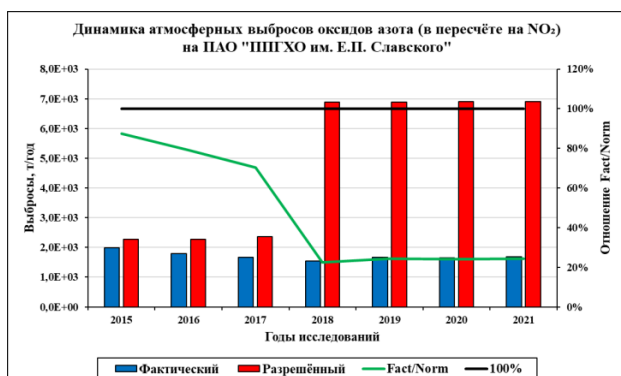


Рисунок А.17 - Диаграмма атмосферных выбросов оксидов азота (в пересчёте на NO₂) на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

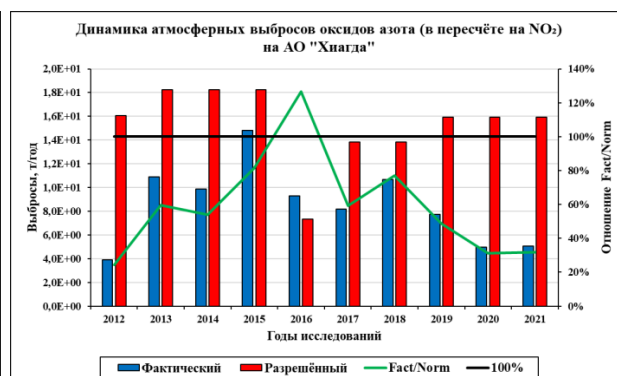


Рисунок А.18 - Диаграмма атмосферных выбросов оксидов азота (в пересчёте на NO₂) на АО «Хиагда» за 2012-2021 гг.

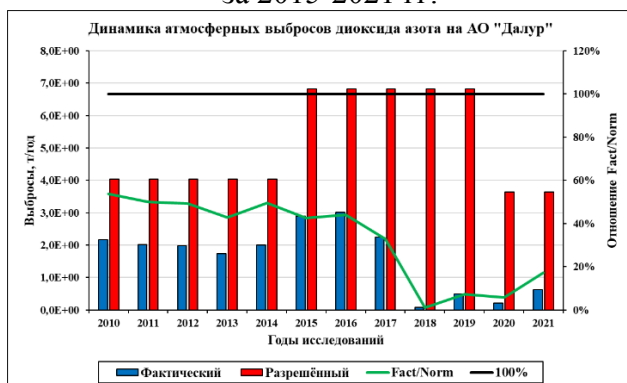


Рисунок А.19 - Диаграмма атмосферных выбросов диоксида азота на АО «Далур» за 2010-2021 гг.

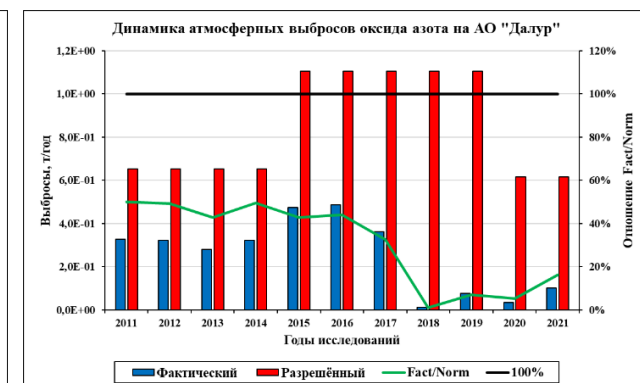


Рисунок А.20 - Диаграмма атмосферных выбросов оксида азота на АО «Далур» за 2011-2021 гг.

В отличие от других предприятий в выбросах АО «Далур» оставляют вещества (сколько в тоннах в год) II класса опасности, а именно: марганец и его соединения, хлористый водород, газообразные фториды (в пересчёте на HF) и плохо растворимые фториды. Выбросы указанных веществ соответствовали допустимым значениям за исследуемый период. АО «Далур» также единственное из рассматриваемых предприятий, в атмосферных выбросах которого содержатся вещества I класса опасности – бензапирен и оксид хрома (IV). Для веществ I класса опасности превышений норматива не было установлено. Для бензапирена характерно постепенное снижение фактических выбросов с $4,00 \cdot 10^{-7}$ т за 2013 год до $8,00 \cdot 10^{-8}$ т за

2021 год. Схожая тенденция наблюдается и для оксида хрома (IV): снижение с $4,00 \cdot 10^{-6}$ за 2014 год до $1,00 \cdot 10^{-4}$ за 2021 год.

Радионуклиды

Радионуклиды, выбрасываемые в атмосферный воздух на рассматриваемых предприятиях, представлены в таблице 2. ПАО "ППГХО им. Е.П. Славского" осуществляет добычу урана преимущественно шахтным способом и его переработку на ГМЗ, и для состава выбросов этого предприятия характерны долгоживущие радионуклиды, радон ^{222}Rn , полоний ^{218}Po , свинец ^{214}Pb , висмут ^{214}Bi , торий ^{232}Th , а также калий ^{40}K . Наибольшую активность в структуре выбросов имеют радон и его ДПР – полоний ^{218}Po , свинец ^{214}Pb и висмут ^{214}Bi . Стоит отметить, что в 2020 году произошло заметное превышение активности выбросов долгоживущих радионуклидов над нормативными значениями. К 2021 г были пересмотрены в сторону увеличения пределы разрешённого выброса.

Выбросы с АО "Далур" и АО "Хиагда" представлены только показателем суммарной альфа активности, данные по конкретным радионуклидам отсутствуют. Из представленных данных следует, что за рассматриваемый период для АО «Далур» характерно снижение активности выбрасываемых в атмосферный воздух альфа-излучающих радионуклидов (с $7,14 \cdot 10^{11}$ в 2017 до $2,72 \cdot 10^{11}$ в 2021), а для АО «Хиагда» наоборот регистрируется увеличение активности выбрасываемых в атмосферный воздух альфа-излучающих радионуклидов (с $1,48 \cdot 10^8$ в 2016 году до $1,01 \cdot 10^{11}$ в 2021 году). При этом валовая активность выбросов АО «Далур» в среднем превышает активность выбросов АО «Хиагда» практически на порядок. Следует также отметить, что динамика увеличения выбросов с АО «Хиагда» такова, что за последние годы (с 2020 г.) они практически сравнялись с выбросами АО «Далур».

Результаты сравнительного анализа поступления загрязняющих веществ в окружающую среду от предприятий, по добыче и переработке урановой руды

Сбросы в водоемы хозяйственно бытового назначения

Сбросы химических веществ осуществляет только ПАО "ППГХО им. Е.П. Славского". Ни одно из рассматриваемых предприятий не осуществляло сбросов радионуклидов в окружающую среду за исследуемый период. Существенных и стабильных превышений контролируемых загрязняющих веществ в сбросах исследуемых предприятий не выявлено за последние годы (2019-2021).

Качественный состав сбросов загрязняющих веществ характеризуется присутствием соединений 1-4 класса опасности. Среди металлов первого класса опасности регистрируется уран, а именно целевой компонент добываемой руды. Следует отметить, что в последние годы (2019-2021) наблюдается положительная динамика увеличения сбросов соединений данного элемента в окружающую среду, при этом установленные пределы сбросов не превышаются. Класс опасности данного элемента обусловлен, главным образом, его токсичностью как тяжелого металла, а не его радиоактивностью. Атмосферный перенос, водная и биологическая миграция – доминирующие механизмы миграции урана в окружающей среде.

Среди металлов второго класса опасности обнаружен кадмий. Этот тяжелый металл кадмий представляет собой один из самых опасных токсикантов (например, он значительно токсичнее свинца). Его отравляющее действие было выявлено лишь недавно. Кадмий характеризуется накоплением и медленным выведением из организма (0,1% в сутки), что может способствовать к хроническому отравлению. Следует отметить, что в 2015 году было зарегистрировано почти четырехкратное превышение допустимого сброса в гидрологическую сеть, после чего мониторинг металла в выбросах прекратился согласно официальным экологическим отчетам.

В составе выбросов регистрируются металлы третьего класса опасности (умеренно опасные), а именно железо, марганец, молибден, цинк, магний. Данные элементы, кроме магния относятся к тяжелым металлам. Поступая в биосферу, они активно включаются в миграционные циклы, аккумулируются в различных компонентах экосистем, в том числе в гидробионтах. Ионы ТМ характеризуются разной миграционной активностью в окружающей среде, присутствуя в природных водах даже в малых концентрациях, оказывают токсическое воздействие на представителей экосистемы. Поэтому ТМ входят в обязательный перечень экологических показателей непрерывного регулярного мониторинга объектов окружающей среды, с целью выявления негативных изменений состояния природных ресурсов, организации проведения природоохранных мероприятий, а также обеспечения соблюдения требований природоохранного законодательства при эксплуатации природных объектов.

Следует подчеркнуть, что спектр мониторируемых металлов весьма ограничен, по сравнению с традиционным перечнем металлов, которые традиционно определяются в шахтных сбросных водах на других площадках подземной добычи урана (мышьяк, никель, свинец и др).

Выбросы в атмосферный воздух

Выбросы долгоживущих радионуклидов уранового ряда, а также радона и его ДПР в атмосферу на ПАО "ППГХО им. Е.П. Славского» на протяжении всего исследуемого периода наблюдения держатся на уровне предельно допустимых значений. На предприятиях АО «Далур» и АО «Хиагда» выбросы не детализированы по радионуклидному составу, фиксируется только суммарная альфа-активность. Из представленных данных следует, что за рассматриваемый период для АО «Далур» характерно снижение активности выбрасываемых в атмосферный воздух альфа-излучающих радионуклидов (с $7,14 \cdot 10^{11}$ в 2017 до $2,72 \cdot 10^{11}$ в 2021), а для АО «Хиагда» наоборот регистрируется увеличение активности выбрасываемых в атмосферный воздух альфа-излучающих радионуклидов (с $1,48 \cdot 10^8$ в 2016

году до $1,01 \cdot 10^{11}$ в 2021 году). При этом валовая активность выбросов АО «Далур» в среднем превышает активность выбросов АО «Хиагда» практически на порядок.

Основные химические загрязняющие вещества, выбрасываемыми в атмосферный воздух и одновременно выявленные на всех трех уранодобывающих предприятиях являются соединениями третьего класса опасности: диоксид серы, оксиды азота, пыль неорганическая, а также оксид углерода относящийся к четвертому классу опасности. Существенно различаются по количественным показателям фактические выбросы диоксида серы АО «Далур» и АО «Хиагда» (0.01т и 300 т. соответственно). При этом выбросы этого вещества на АО «Хиагда» стабильно соответствуют уровню установленных нормативов. По сравнению с другими рассматриваемыми предприятиями выбросы в атмосферный воздух предприятия АО «Далур» характеризуются большим качественным разнообразием экотоксикантов. Обнаружены оксиды железа, хлористый водород, фториды (газообразные и плохо растворимые), вещества первого класса опасности – бензапирен и хроматриоксид. Вместе с тем, количественные показатели выбросов этих соединений не превышают допустимые нормы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Отчет по экологической безопасности ОАО «Хиагда» за 2012 год.
URL: https://khiagda.armz.ru/images/File/Khiagda/2013/ecology_report_2012_khiagda.pdf (дата обращения 18.08.2023)
2. Отчет по экологической безопасности ОАО «Хиагда» за 2013 год.
URL: https://khiagda.armz.ru/images/File/Khiagda/2014/ecology_report_khiagda_2013.pdf (дата обращения 18.08.2023)
3. Отчет по экологической безопасности ОАО «Хиагда» за 2014 год.
URL: https://khiagda.armz.ru/images/File/Khiagda/2015/ecology_report_khiada_2014.pdf (дата обращения 18.08.2023)
4. Отчет по экологической безопасности ОАО «Хиагда» за 2015 год.
URL: https://khiagda.armz.ru/images/File/Khiagda/2016/khiagda_ecology_report_2015.pdf (дата обращения 18.08.2023)
5. Отчет по экологической безопасности ОАО «Хиагда» за 2016 год.
URL: https://khiagda.armz.ru/images/File/Khiagda/2017/khiagda_ecology_report_2016.pdf (дата обращения 18.08.2023)
6. Отчет по экологической безопасности ОАО «Хиагда» за 2017 год.
URL: https://khiagda.armz.ru/images/File/Khiagda/2018/khiagda_ecology_report_2017.pdf (дата обращения 18.08.2023)
7. Отчет по экологической безопасности ОАО «Хиагда» за 2018 год.
URL: https://khiagda.armz.ru/images/File/Khiagda/2019/ecology_report_2018.pdf (дата обращения 18.08.2023)
8. Отчет по экологической безопасности ОАО «Хиагда» за 2019 год.
URL: https://khiagda.armz.ru/images/File/Khiagda/2020/ecology_report_2019.pdf (дата обращения 18.08.2023)
9. Отчет по экологической безопасности ОАО «Хиагда» за 2020 год.
URL: https://khiagda.armz.ru/images/File/Khiagda/2020/ecology_report_2020.pdf (дата обращения 18.08.2023)

10. Отчет по экологической безопасности ОАО «Хиагда» за 2021 год.
URL: https://khiagda.armz.ru/images/File/Khiagda/2020/ecology_report_2020.pdf
(дата обращения 18.08.2023)
11. Отчет по экологической безопасности ПАО "ППГХО" за 2015 год.
URL: https://priargunsky.armz.ru/images/File/priargunsky/ecology_report/ecology_report_ppgho_2015.pdf (дата обращения 18.08.2023)
12. Отчет по экологической безопасности ПАО "ППГХО" за 2016 год.
URL: https://priargunsky.armz.ru/images/File/priargunsky/2017/ppgho_ecology_report_2016.pdf (дата обращения 18.08.2023)
13. Отчет по экологической безопасности ПАО "ППГХО" за 2017 год.
URL: https://priargunsky.armz.ru/images/File/priargunsky/2018/ppgho_ecology_report_2017.pdf (дата обращения 18.08.2023)
14. Отчет по экологической безопасности ПАО "ППГХО" за 2018 год.
URL: https://priargunsky.armz.ru/images/File/priargunsky/2019/ecology_report_2018.pdf (дата обращения 18.08.2023)
15. Отчет по экологической безопасности ПАО "ППГХО" за 2019 год.
URL: https://priargunsky.armz.ru/images/File/priargunsky/2019/ecology_report_2019.pdf (дата обращения 18.08.2023)
16. Отчет по экологической безопасности ПАО "ППГХО" за 2020 год.
URL: https://priargunsky.armz.ru/images/File/priargunsky/2020/ecology_report_2020.pdf (дата обращения 18.08.2023)
17. Отчет по экологической безопасности ПАО "ППГХО" за 2021 год.
URL: https://priargunsky.armz.ru/images/File/priargunsky/2021/ecology_report_2021.pdf (дата обращения 18.08.2023)
18. Отчёт по экологической безопасности ЗАО «Далур» за 2010 год.
URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2012/dalur_eco_report_2010.pdf
(дата обращения 18.08.2023)
19. Отчёт по экологической безопасности ЗАО «Далур» за 2011 год.
URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2013/ecology_report_2011.pdf (дата обращения 18.08.2023)

20. Отчёт по экологической безопасности ЗАО «Далур» за 2012 год.
URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2013/ecology_report_2012.pdf (дата обращения 18.08.2023)

21. Отчёт по экологической безопасности ЗАО «Далур» за 2013 год.
URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2014/ecology_report_2013_dalur.pdf (дата обращения 18.08.2023)

22. Отчёт по экологической безопасности ЗАО «Далур» за 2014 год.
URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2015/dalur_ecology_report_2014.pdf (дата обращения 18.08.2023)

23. Отчёт по экологической безопасности ЗАО «Далур» за 2015 год.
URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2016/dalur_ecology_report_2015.pdf (дата обращения 18.08.2023)

24. Отчёт по экологической безопасности ЗАО «Далур» за 2016 год.
URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2017/dalur_ecology_report_2016.pdf (дата обращения 18.08.2023)

25. Отчёт по экологической безопасности ЗАО «Далур» за 2017 год.
URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2018/dalur_ecology_report_2017.pdf (дата обращения 18.08.2023)

26. Отчёт по экологической безопасности ЗАО «Далур» за 2018 год.
URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2019/dalur_ecology_report_2018.pdf (дата обращения 18.08.2023)

27. Отчёт по экологической безопасности ЗАО «Далур» за 2019 год.
URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2020/ecology_report_2019.pdf (дата обращения 18.08.2023)

28. Отчёт по экологической безопасности ЗАО «Далур» за 2020 год.
URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2021/ecology_report_2020.pdf (дата обращения 18.08.2023)

29. Отчёт по экологической безопасности ЗАО «Далур» за 2021 год.
URL: https://dalur.armz.ru/images/File/dalur/2022/2021_.pdf (дата обращения 18.08.2023)

Динамика сбросов со сточными водами и выбросов в атмосферный воздух
химических веществ и радионуклидов на предприятиях
ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского», АО «Далур» и АО «Хиагда».

2. Сбросы химических веществ ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского»



Рисунок Б.1- Диаграмма сбросов со сточными водами взвешенных веществ на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

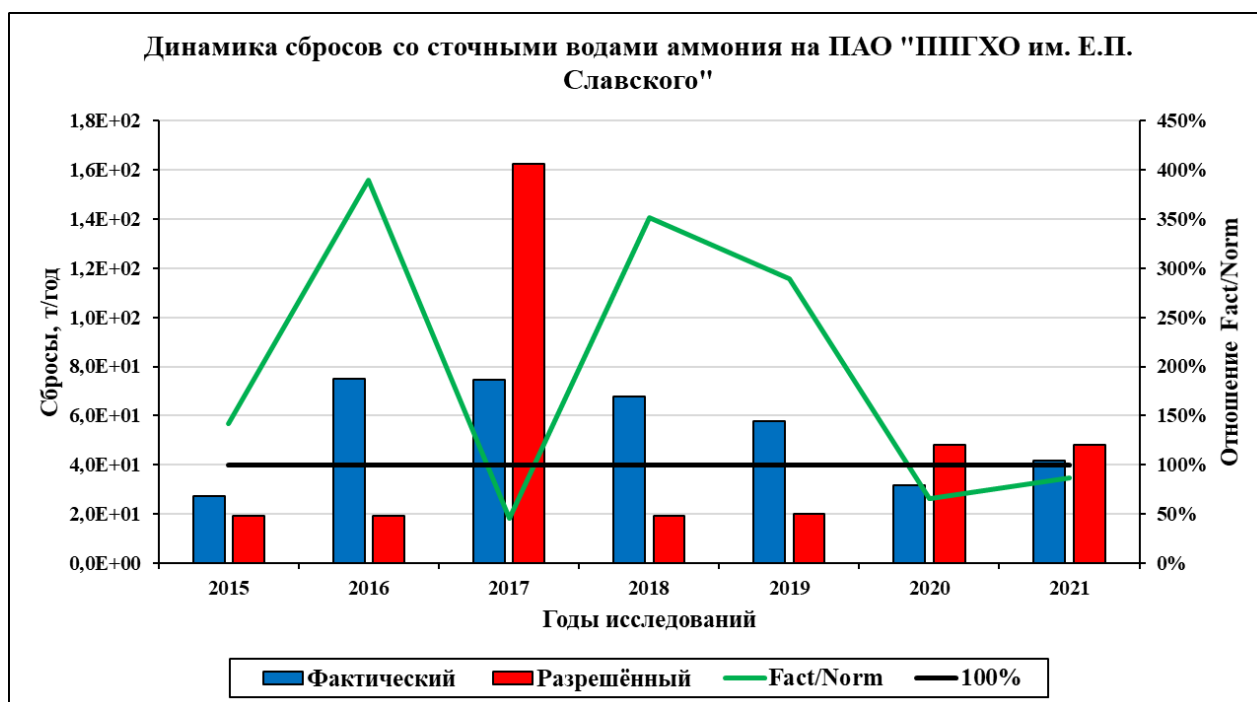


Рисунок Б.2 - Диаграмма сбросов со сточными водами аммония на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

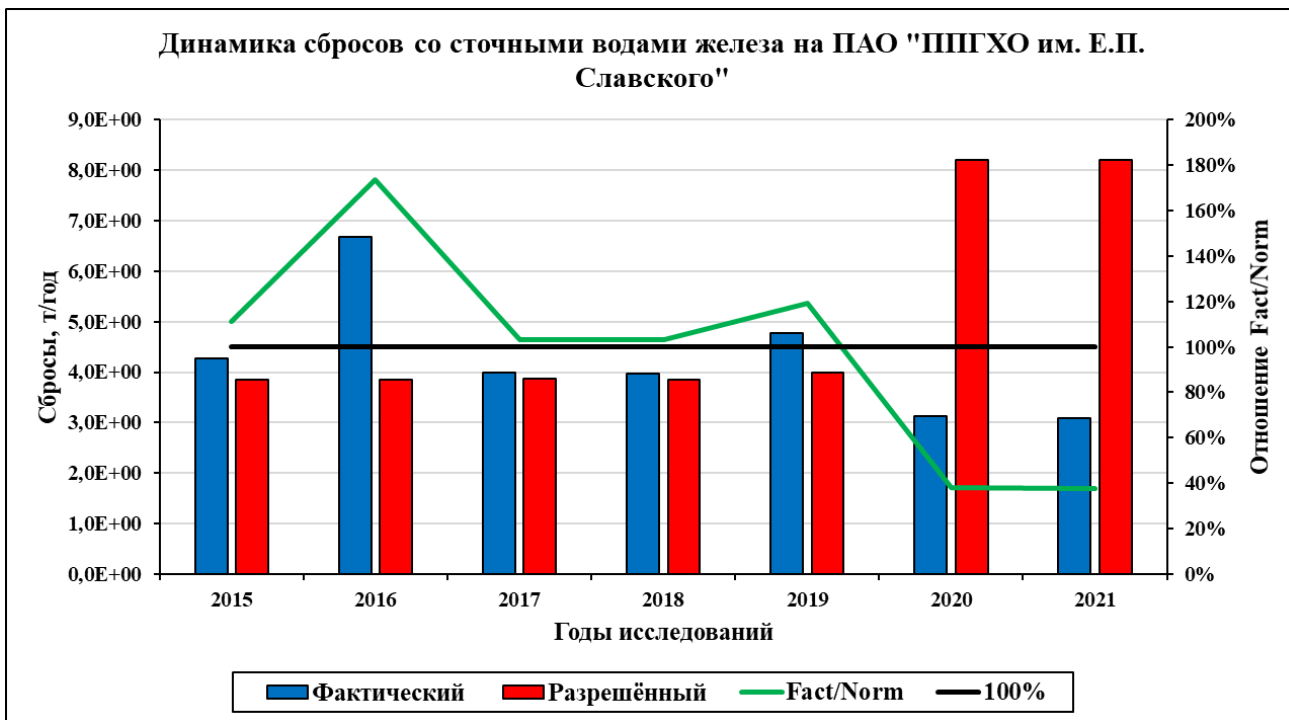


Рисунок Б.3 - Диаграмма сбросов со сточными водами железа на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

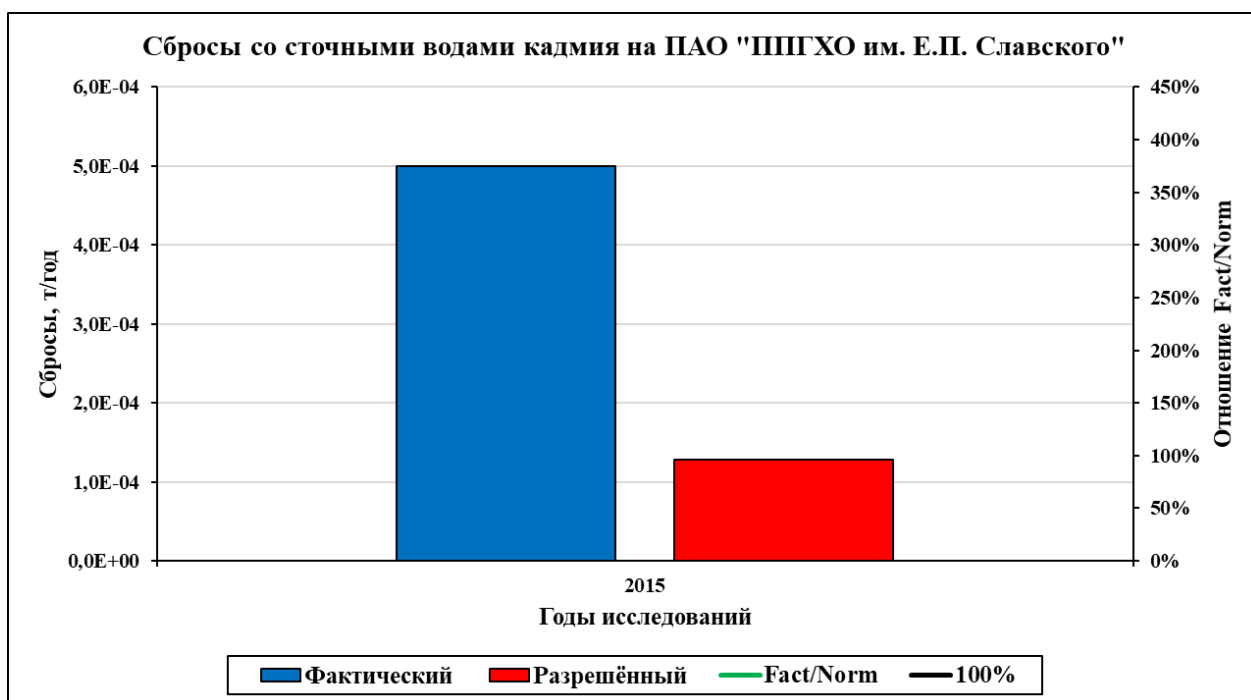


Рисунок Б.4 - Диаграмма сбросов со сточными водами кадмия на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015 г.

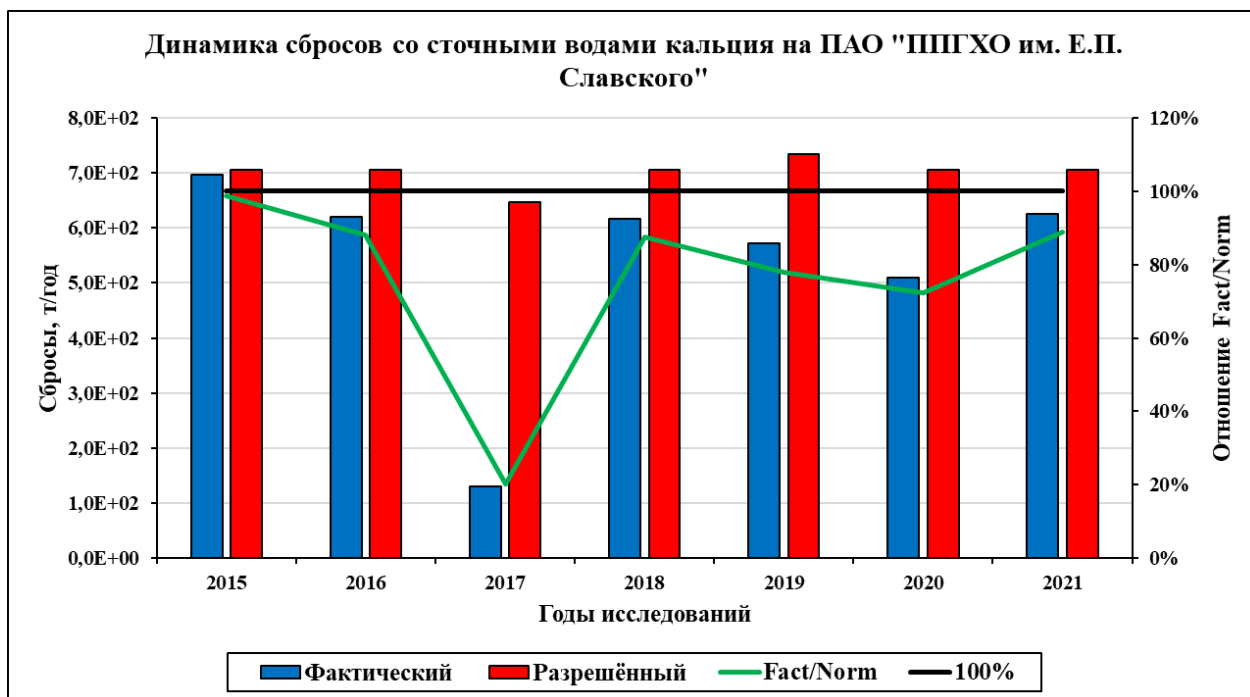


Рисунок Б.5 - Диаграмма сбросов со сточными водами кальция на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

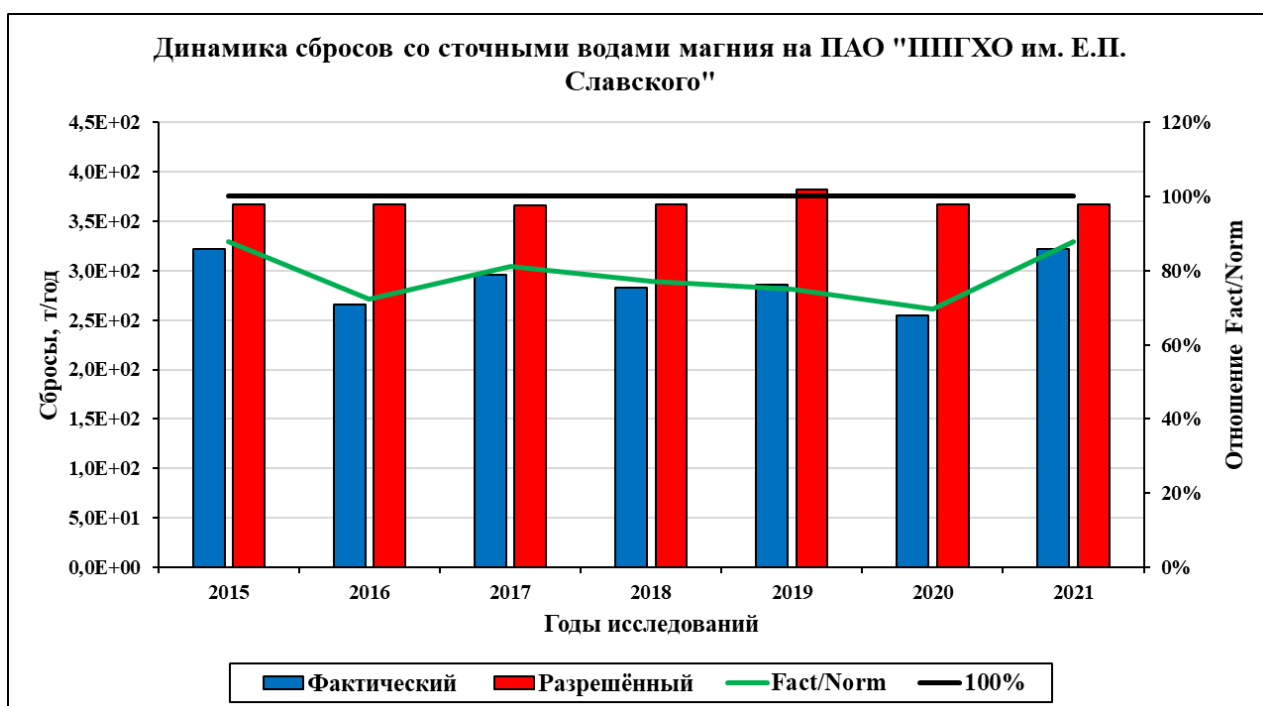


Рисунок Б.6 - Диаграмма сбросов со сточными водами магния на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

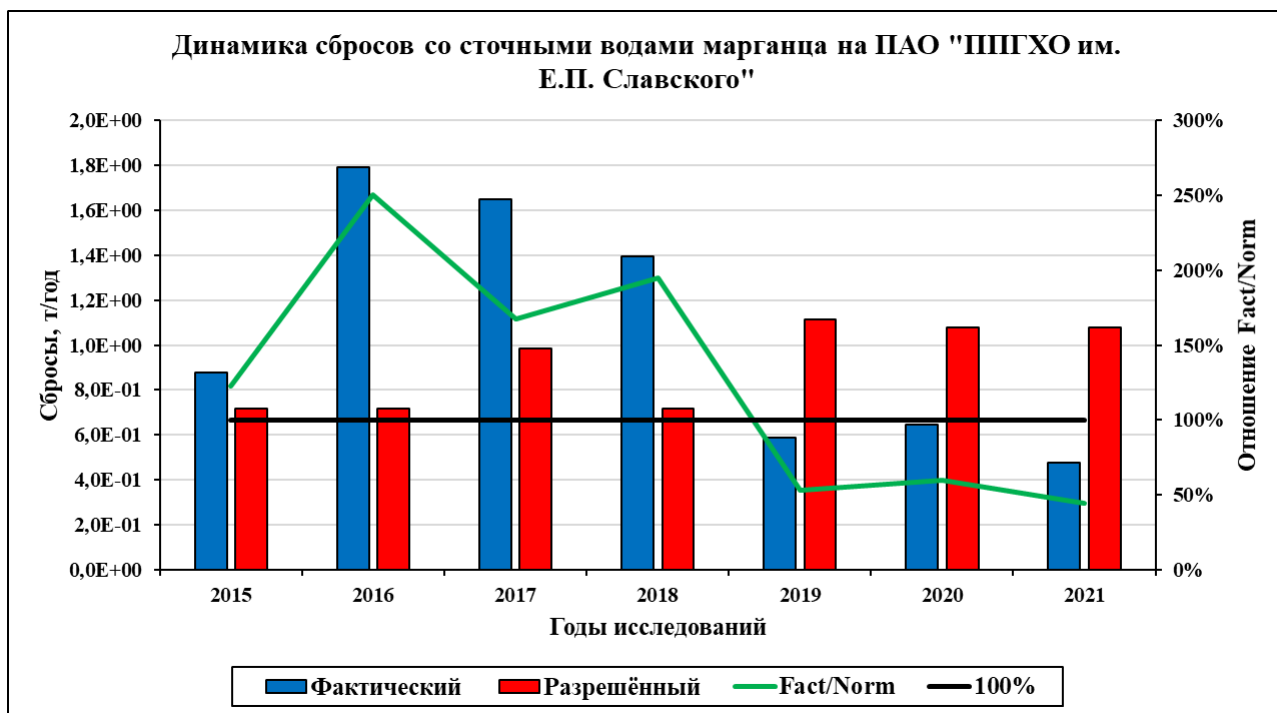


Рисунок Б.7 - Диаграмма сбросов со сточными водами марганца на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

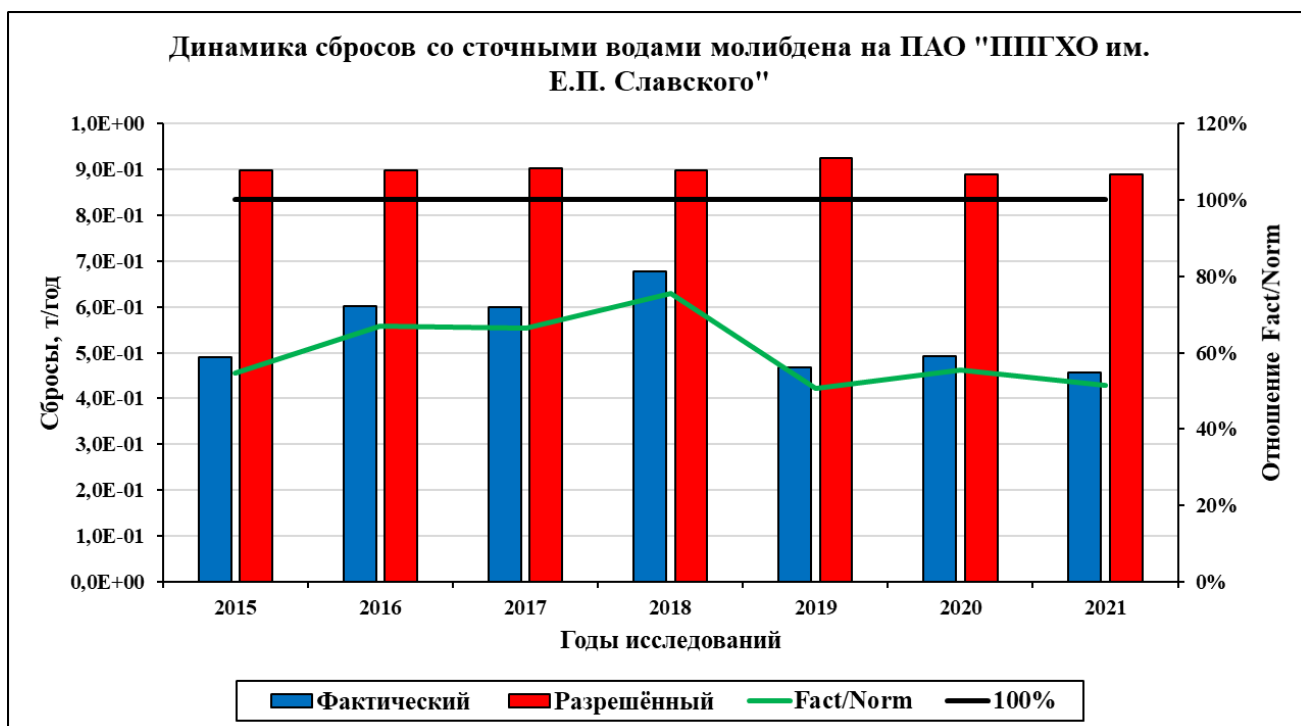


Рисунок Б.8 - Диаграмма сбросов со сточными водами молибдена на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

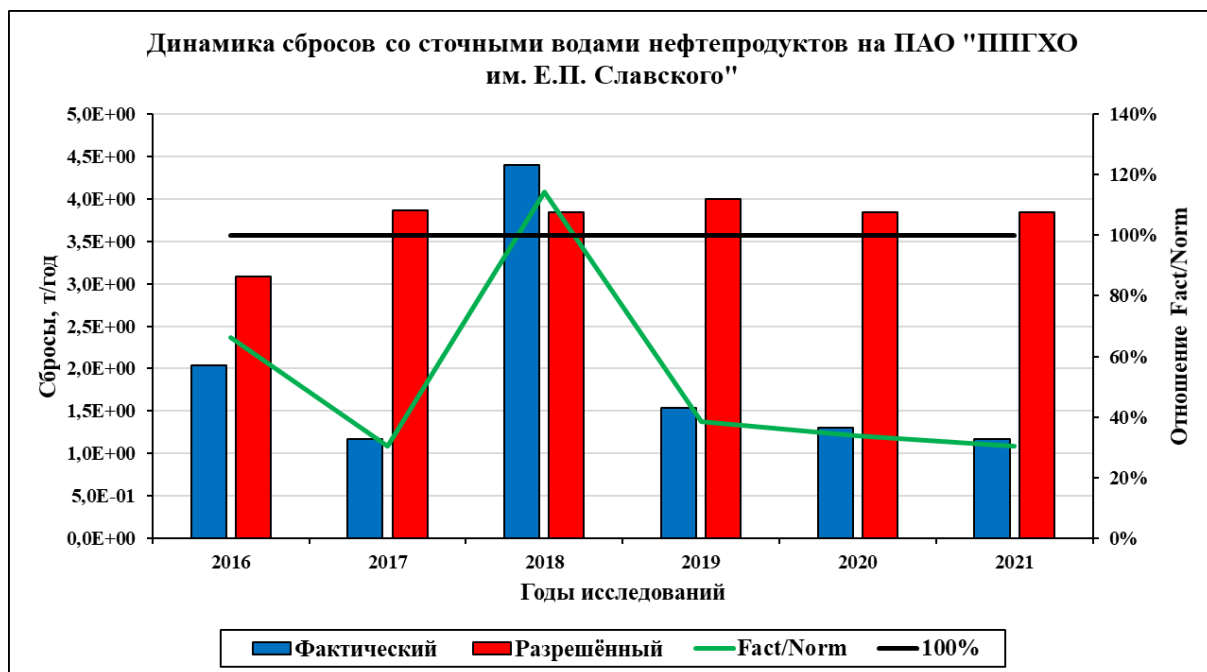


Рисунок Б.9 - Диаграмма сбросов со сточными водами нефтепродуктов на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2016-2021 гг.

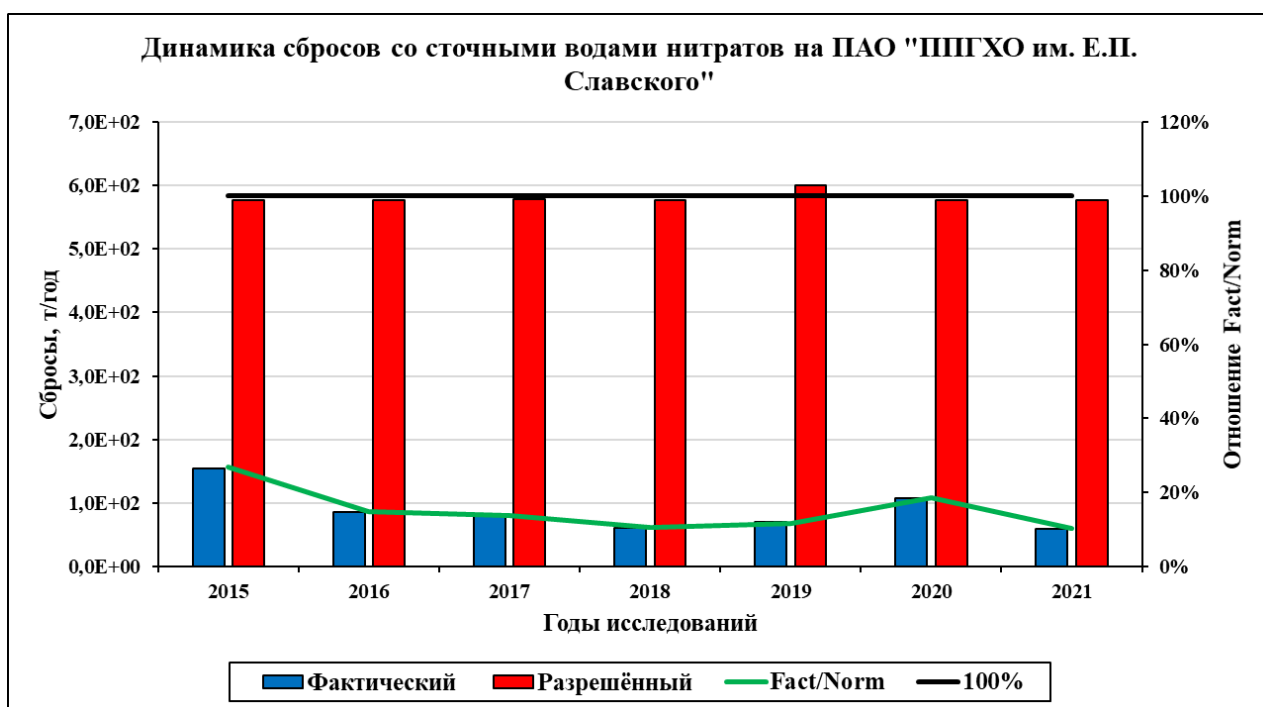


Рисунок Б.10 - Диаграмма сбросов со сточными водами нитратов на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

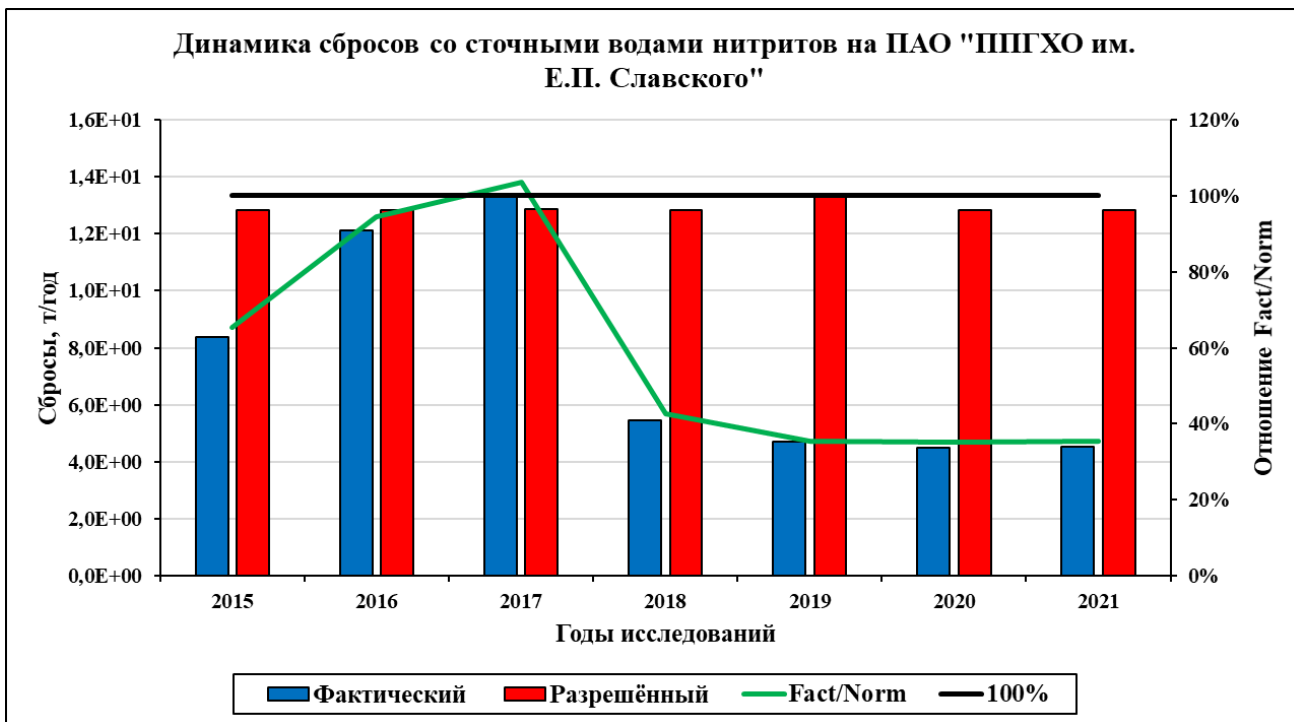


Рисунок Б.11 - Диаграмма сбросов со сточными водами нитритов на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

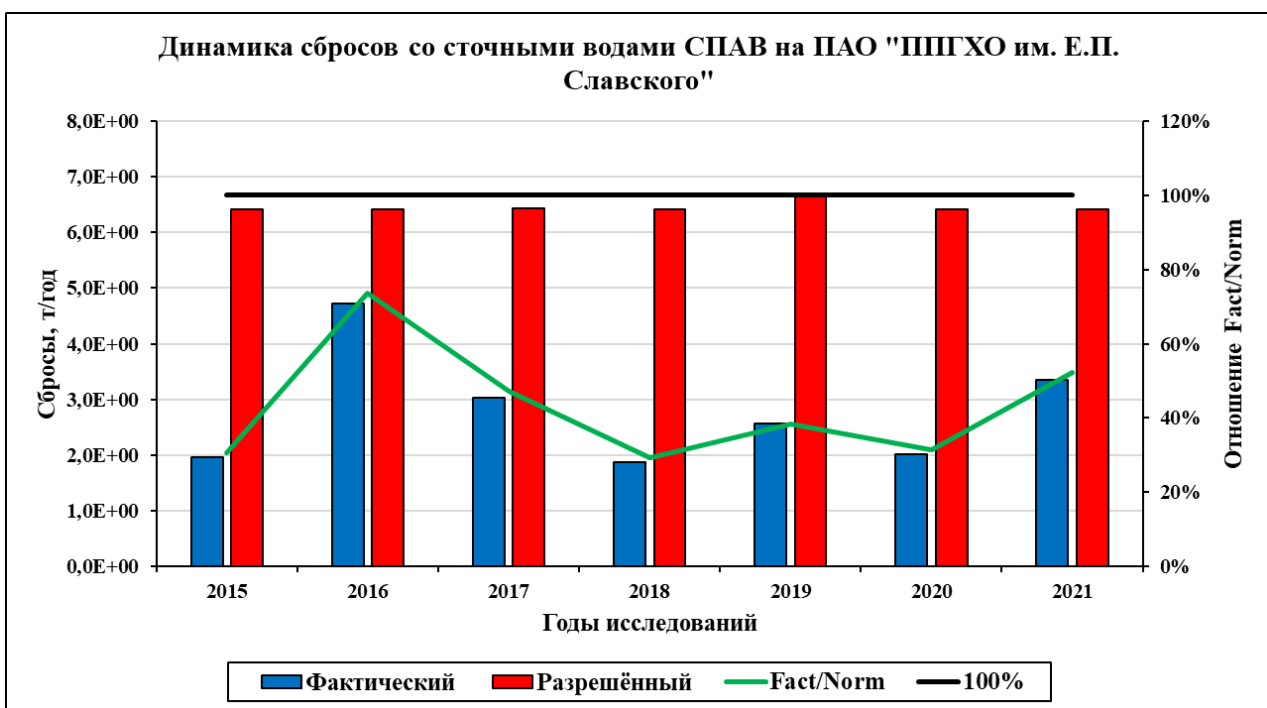


Рисунок Б.12 - Диаграмма сбросов со сточными водами СПАВ на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

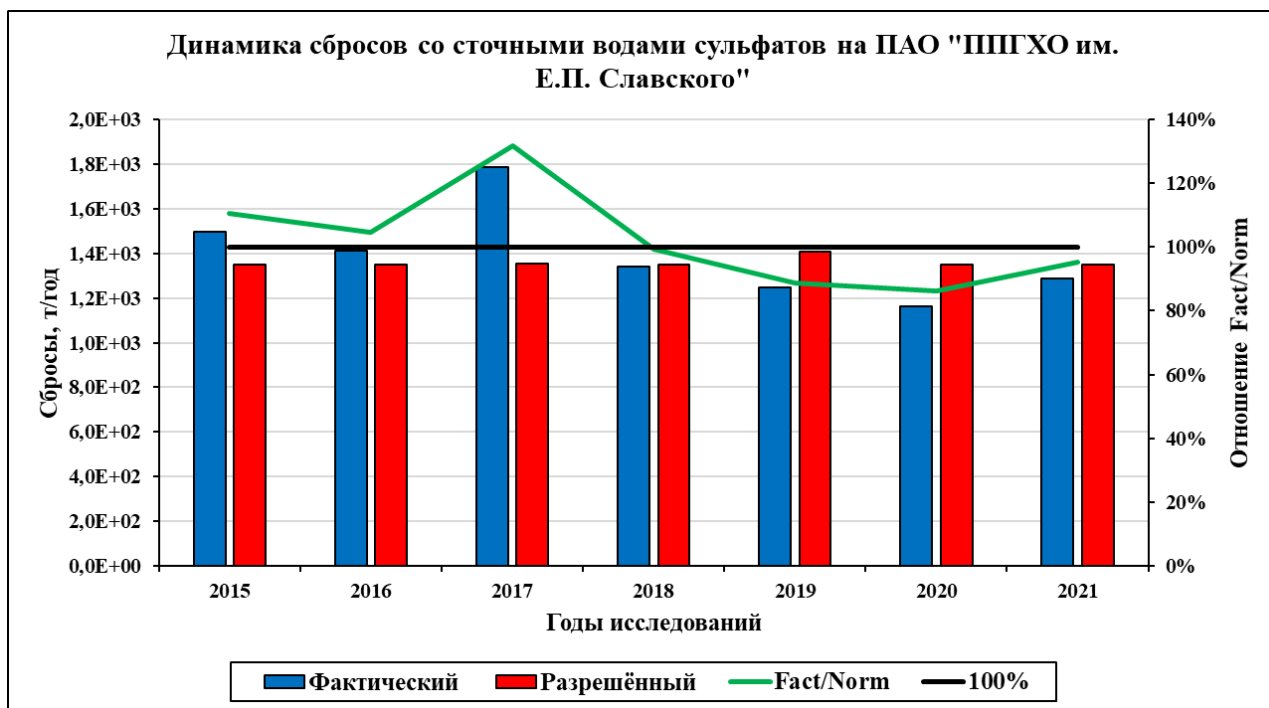


Рисунок Б.13 - Диаграмма сбросов со сточными водами сульфатов на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

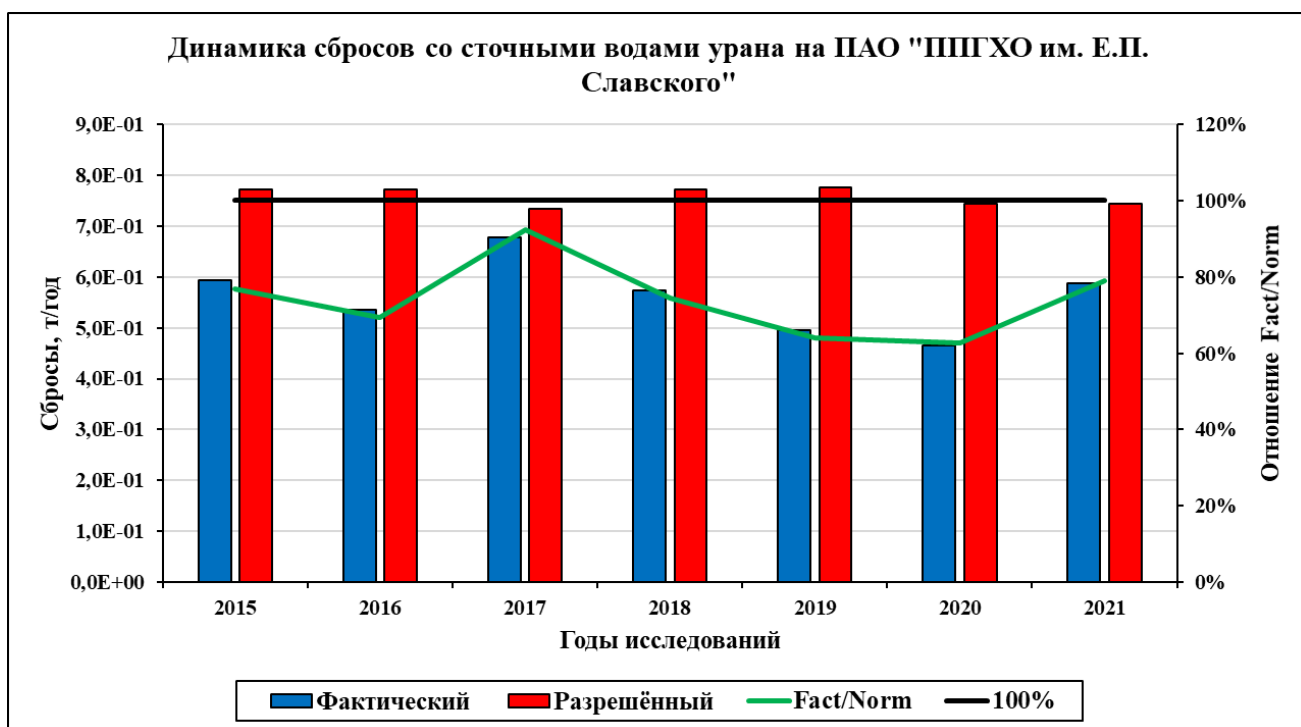


Рисунок Б.14 - Диаграмма сбросов со сточными водами урана на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

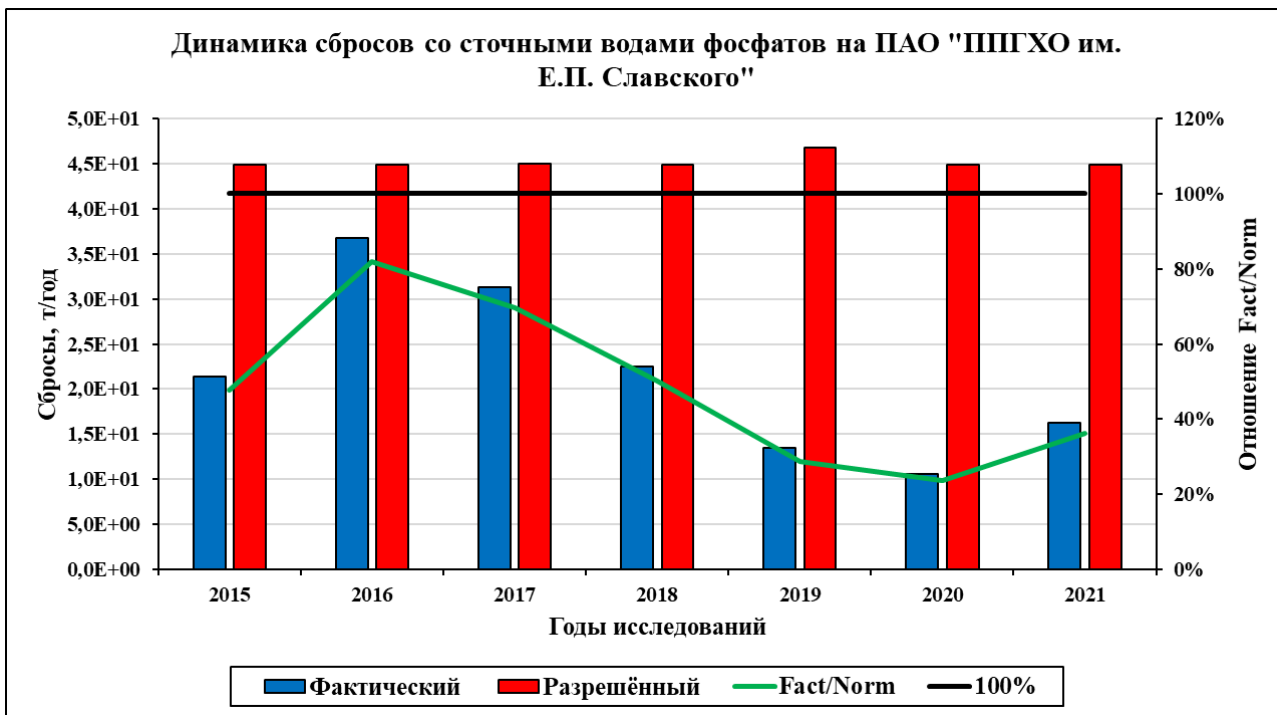


Рисунок Б.15 - Диаграмма сбросов со сточными водами фосфатов на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

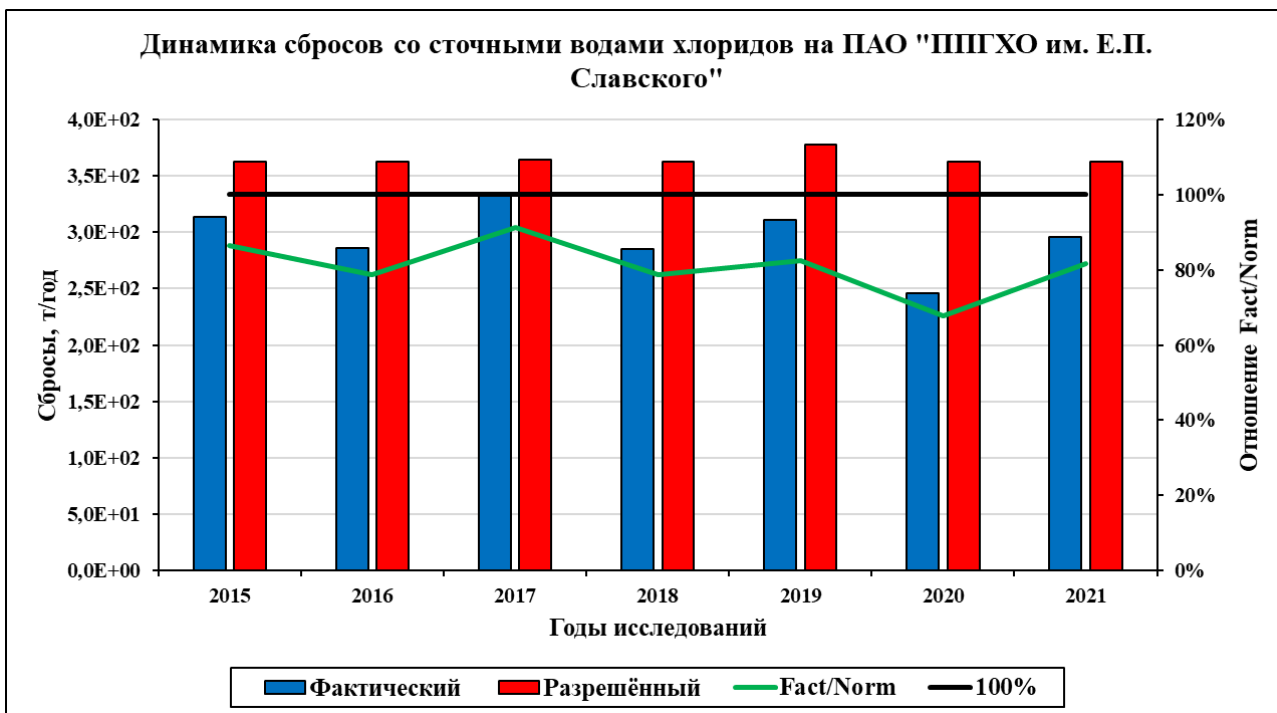


Рисунок Б.16 - Диаграмма сбросов со сточными водами хлоридов на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

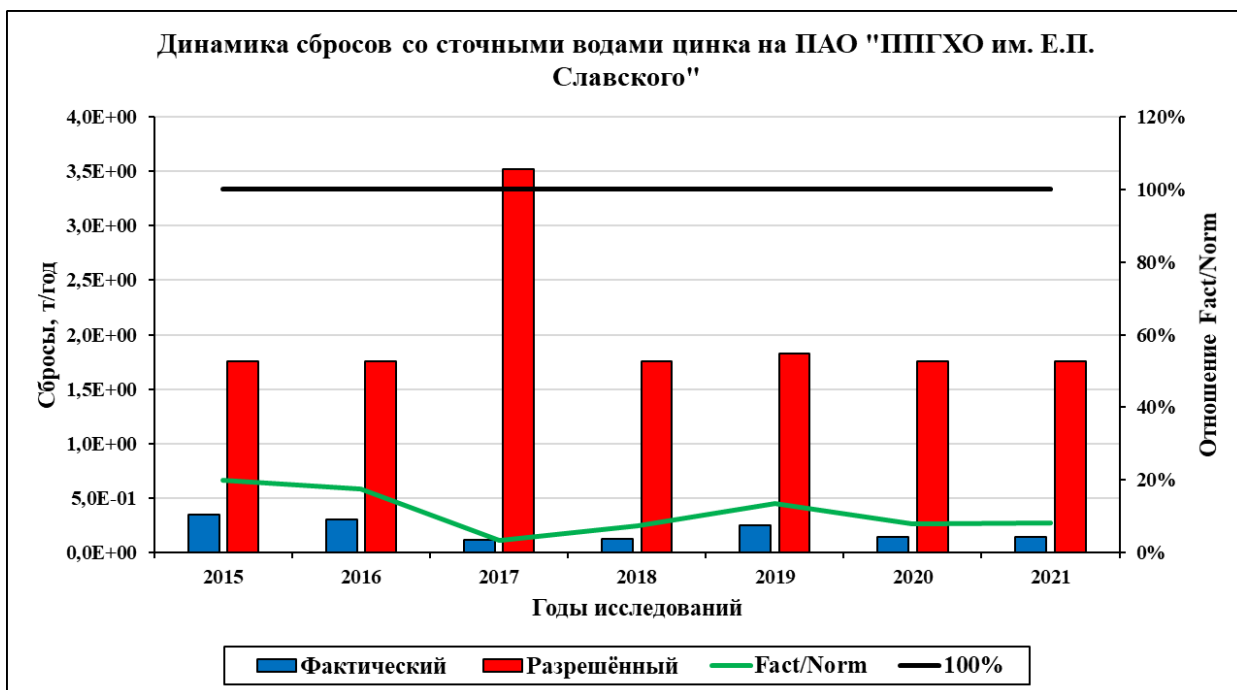


Рисунок Б.17 - Диаграмма сбросов со сточными водами цинка на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

3. Выбросы радионуклидов

3.1. ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского»



Рисунок Б.18 - Диаграмма атмосферных выбросов долгоживущих радионуклидов на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.



Рисунок Б.19 - Диаграмма атмосферных выбросов Rn-222 на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

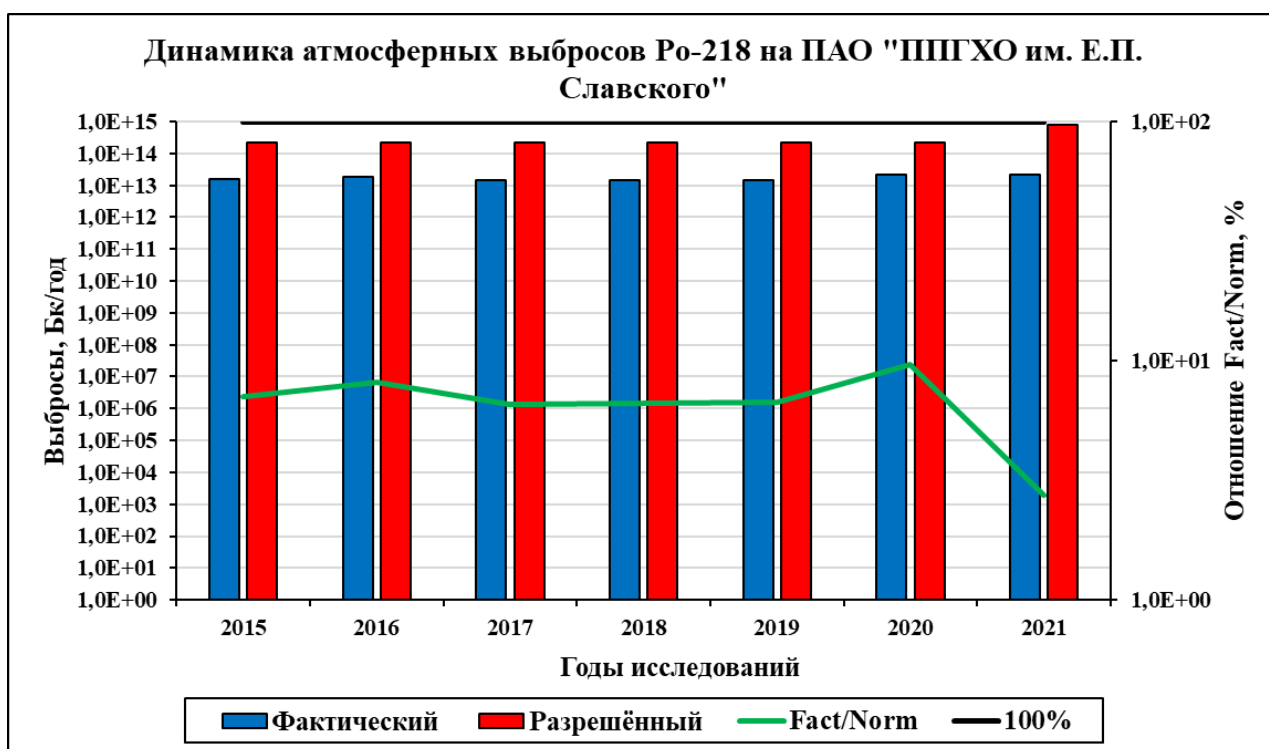


Рисунок Б.20 - Диаграмма атмосферных выбросов Po-218 на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

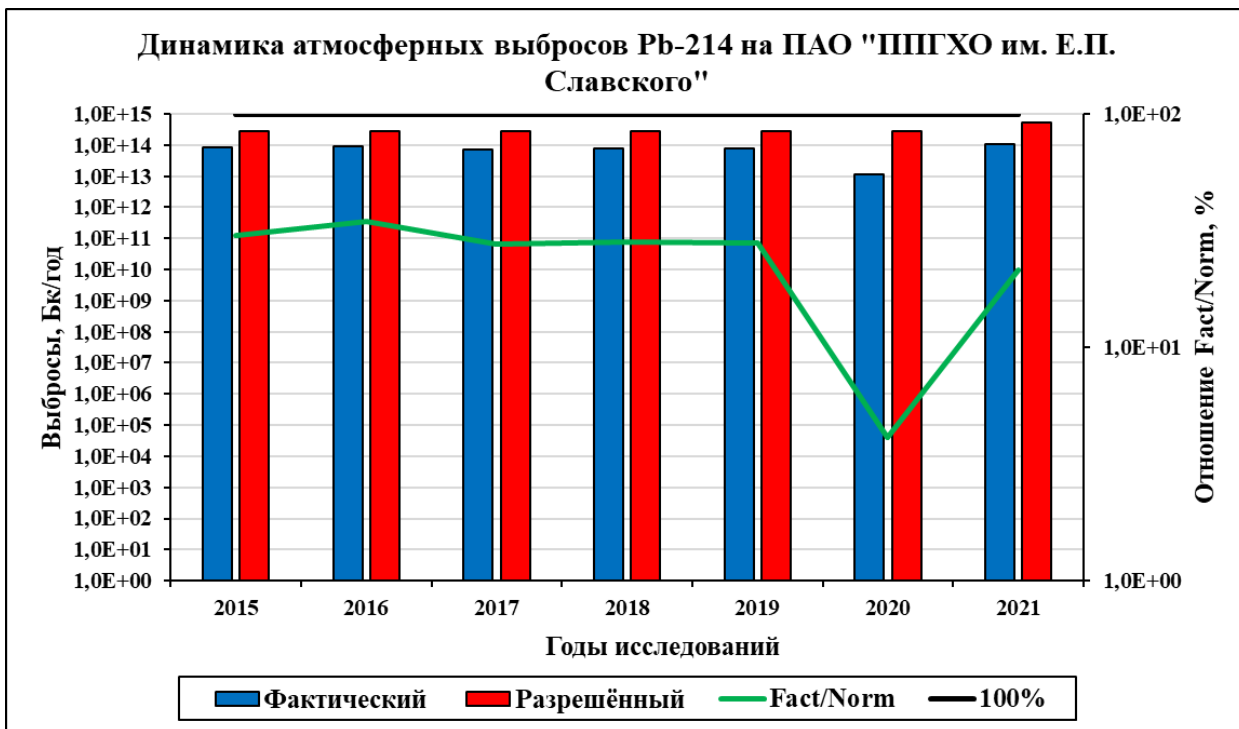


Рисунок Б.21 - Диаграмма атмосферных выбросов Рb-214 на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

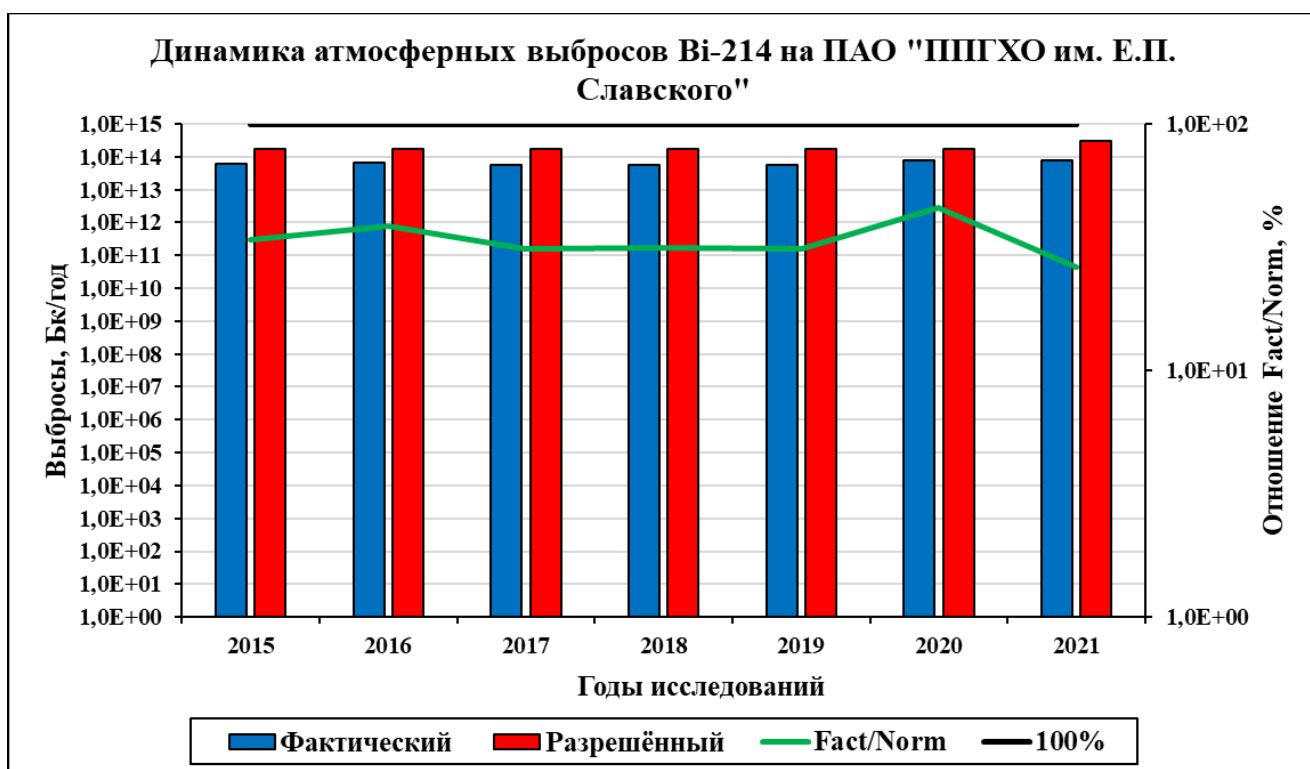


Рисунок Б.22 - Диаграмма атмосферных выбросов Вi-214 на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

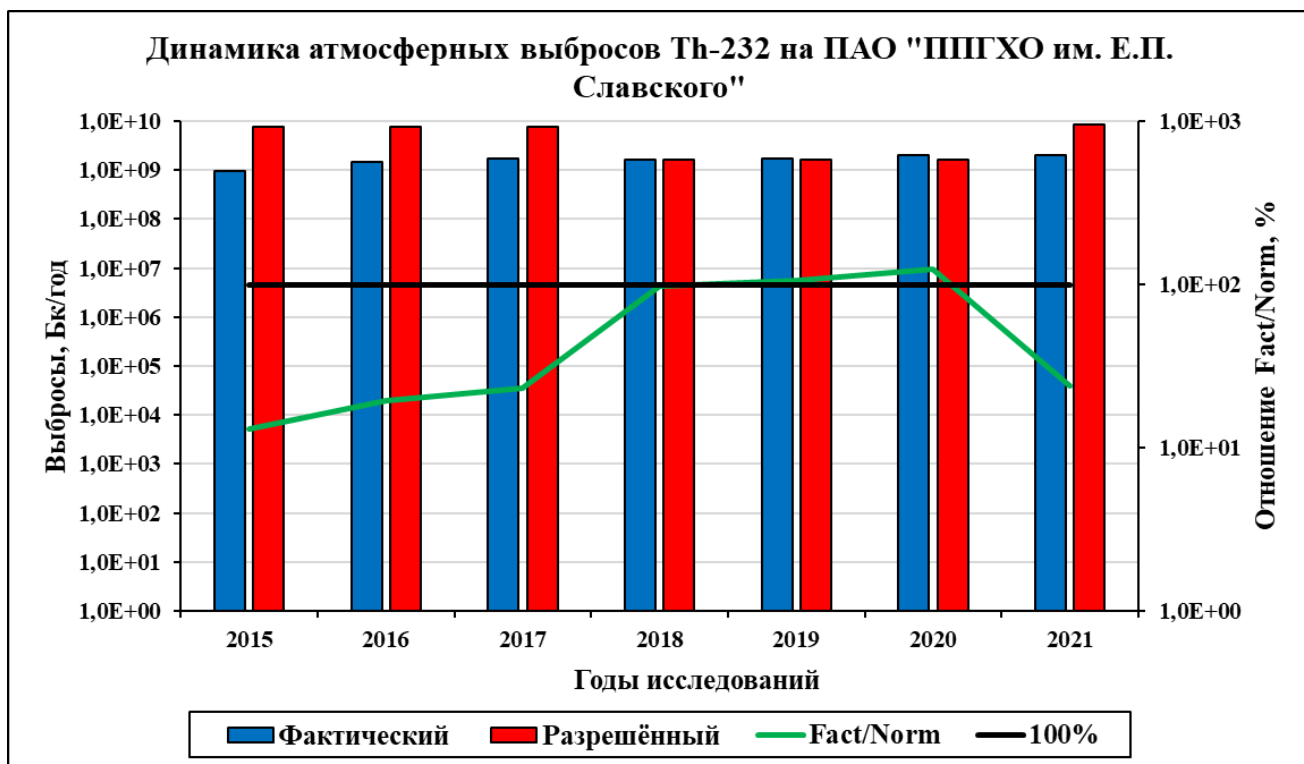


Рисунок Б.23 - Диаграмма атмосферных выбросов Th-232 на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.



Рисунок Б.24 - Диаграмма атмосферных выбросов К-40 на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

3.2. АО «Далур» и АО «Хиагда»

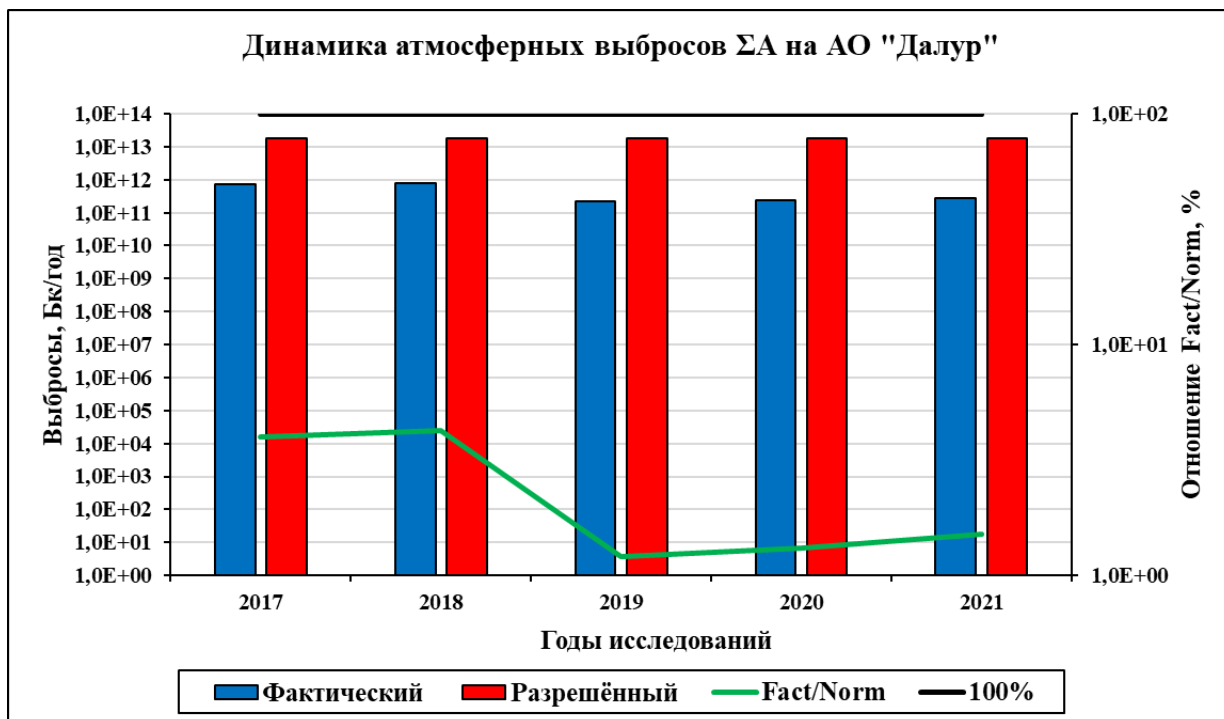


Рисунок Б.25 - Диаграмма атмосферных выбросов ΣА на АО «Далур» за 2017-2021 гг.

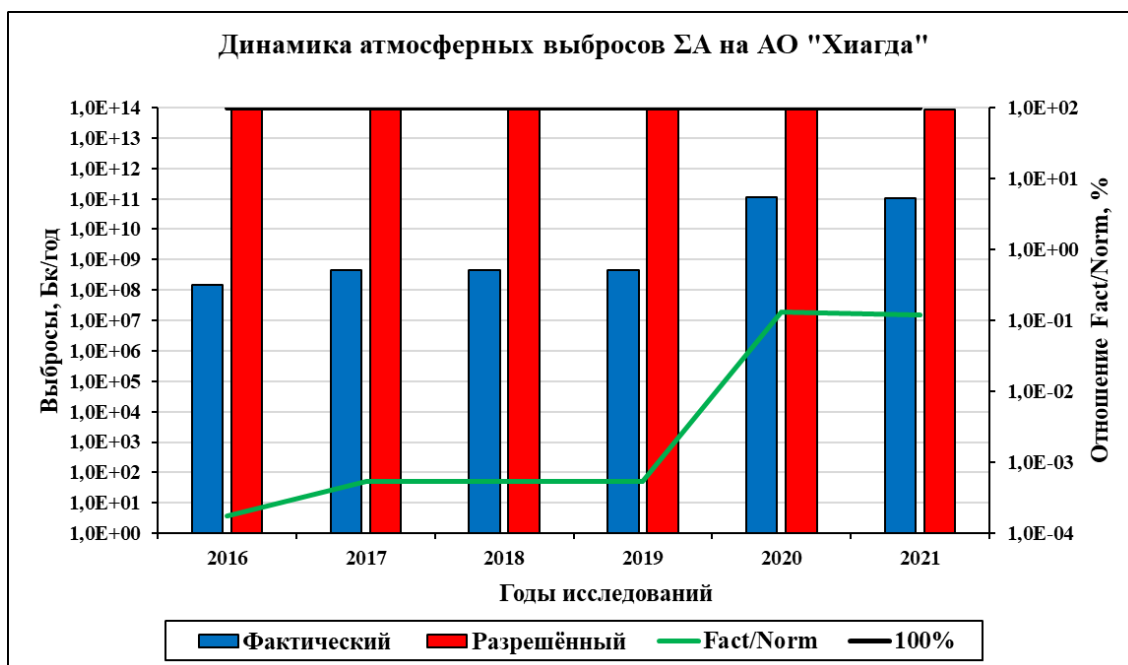


Рисунок Б.26 - Диаграмма атмосферных выбросов ΣА на АО «Хиагда» за 2016-2021 гг.

5. Выбросы химических веществ

5.1. ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского», АО «Далур» и АО «Хиагда»

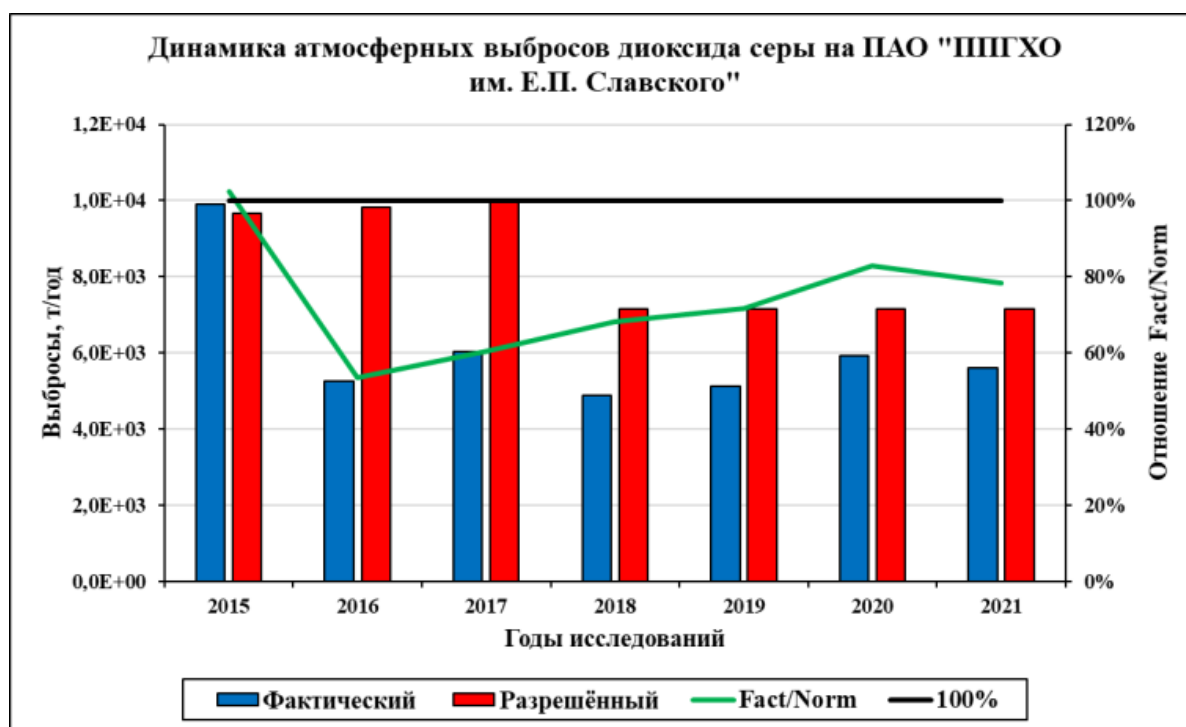


Рисунок Б.27 - Диаграмма атмосферных выбросов диоксида серы на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

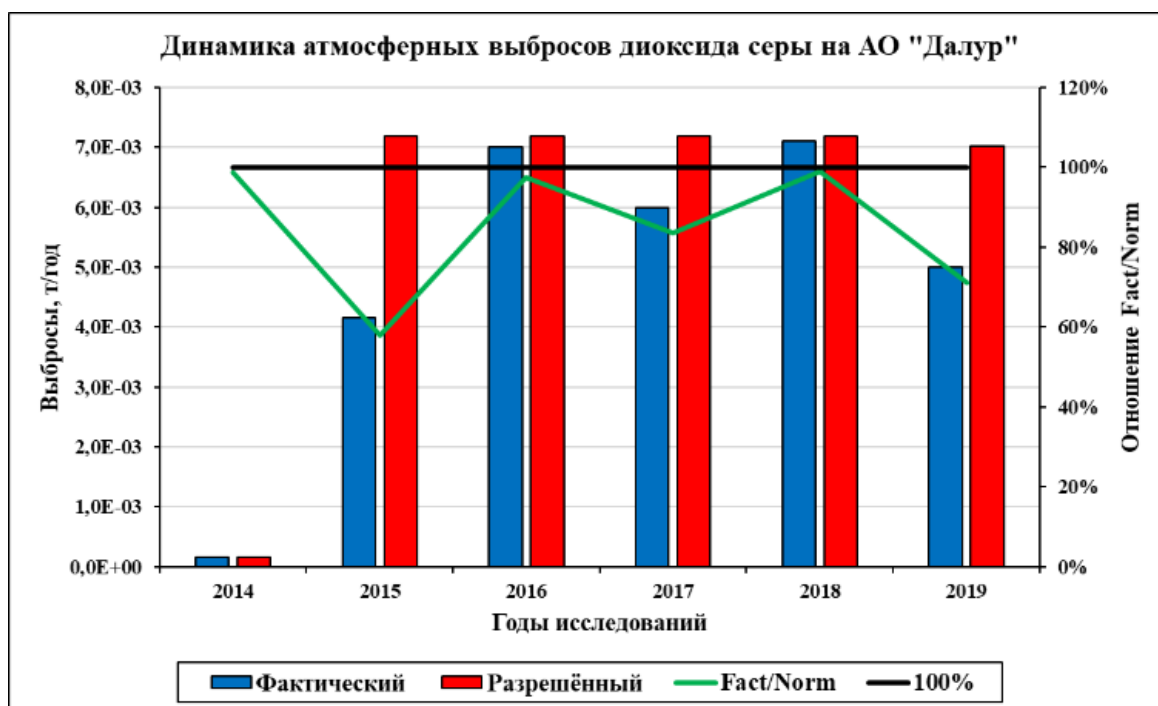


Рисунок Б.28 - Диаграмма атмосферных выбросов диоксида серы на АО «Далур» за 2014-2019 гг.



Рисунок Б.29 - Диаграмма атмосферных выбросов диоксида серы на АО «Хиагда» за 2012-2021 гг.

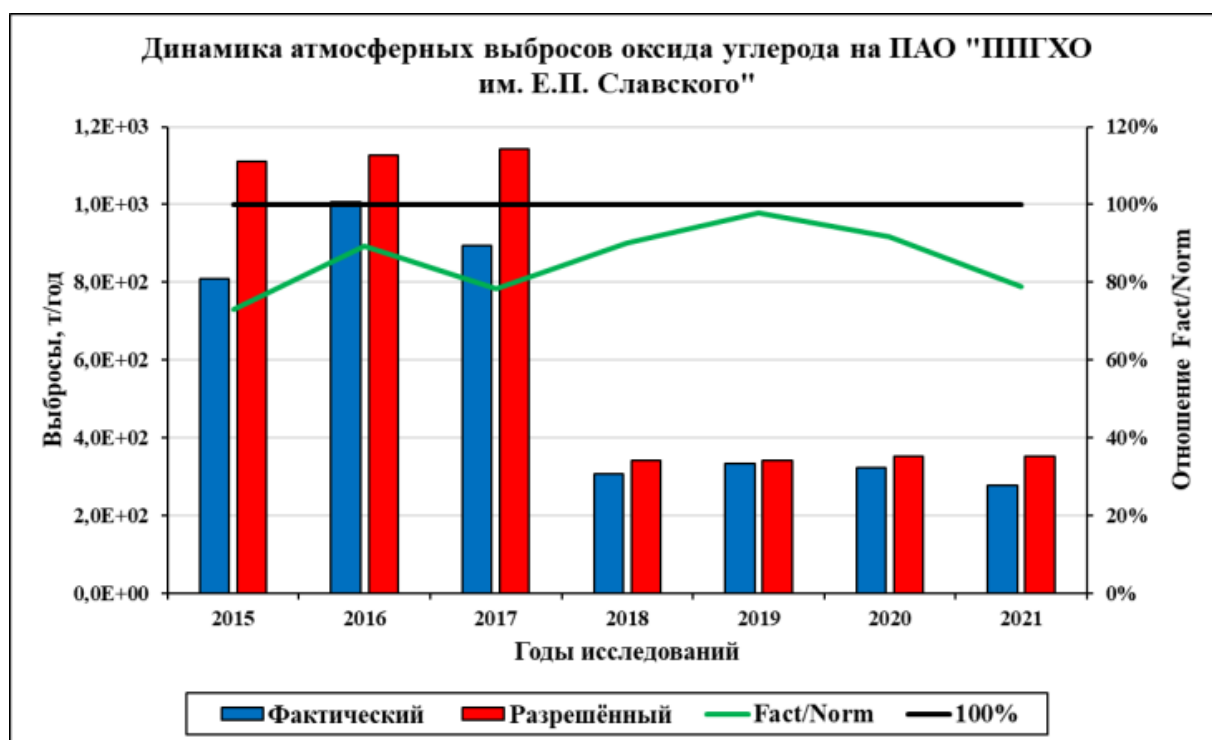


Рисунок Б.30 - Диаграмма атмосферных выбросов оксида углерода на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

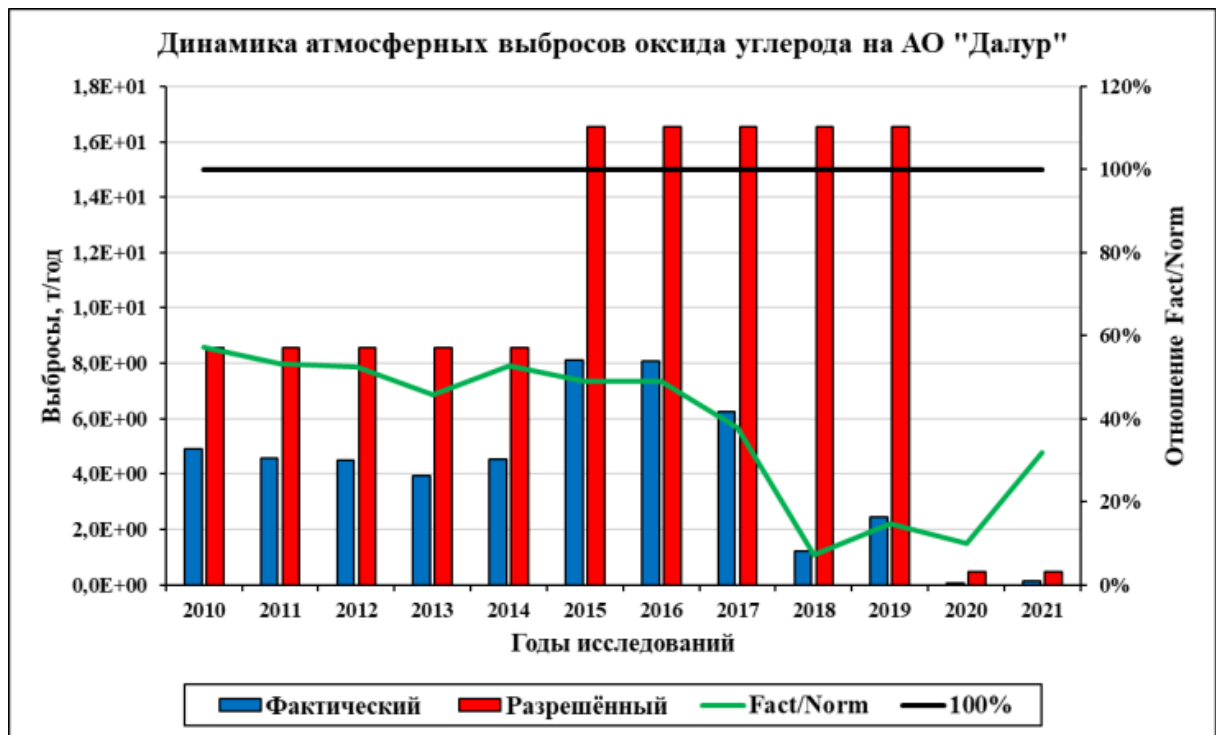


Рисунок Б.31 - Диаграмма атмосферных выбросов оксида углерода на АО «Далур» за 2010-2021 гг.

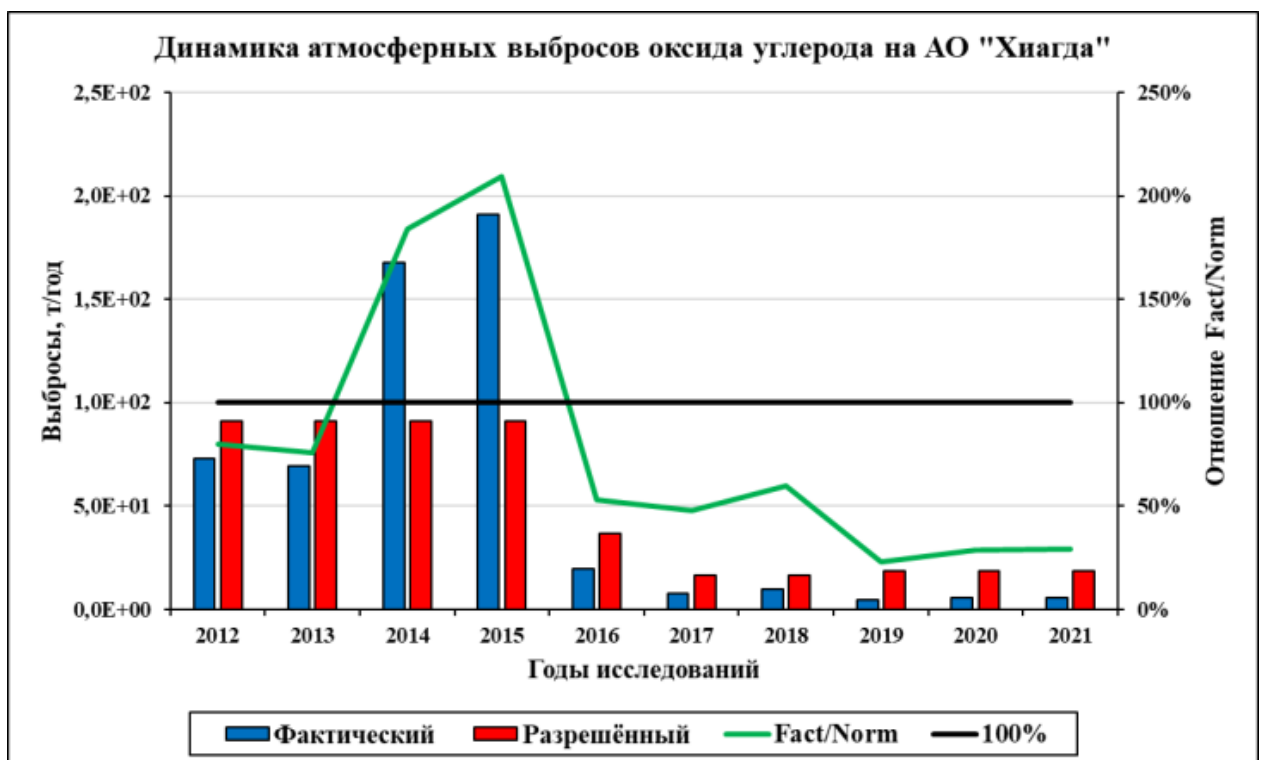


Рисунок Б.32 - Диаграмма атмосферных выбросов оксида углерода на АО «Хиагда» за 2012-2021 гг.

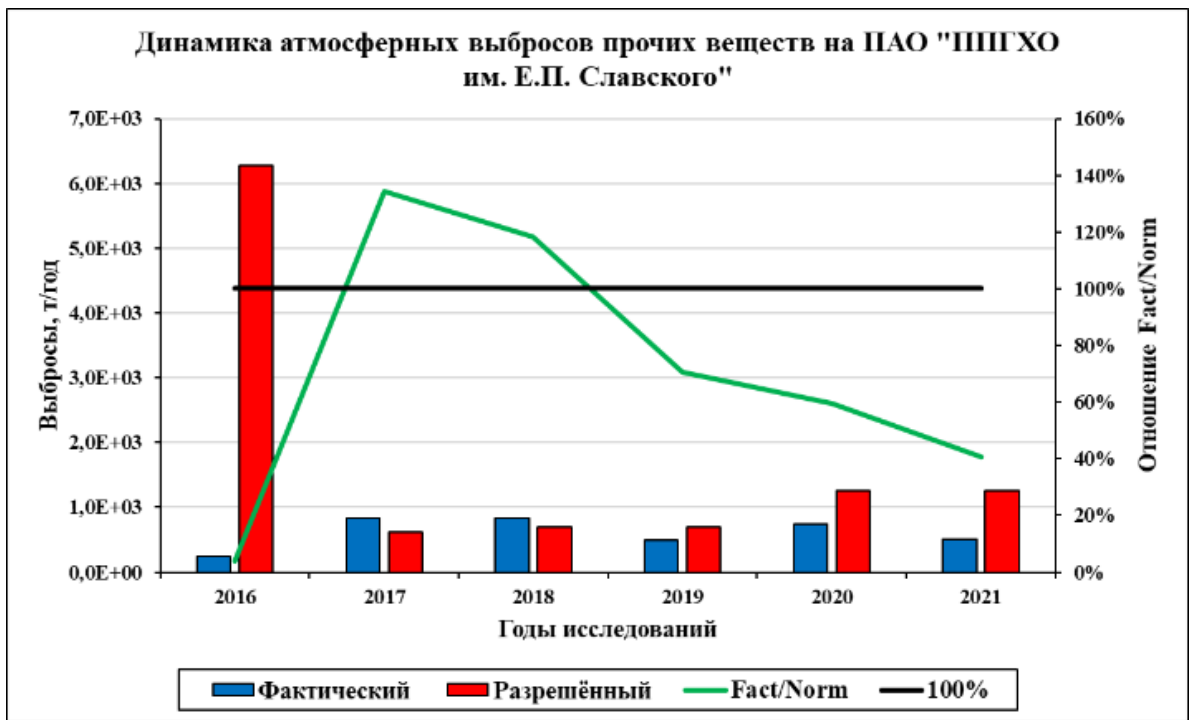


Рисунок Б.33 - Диаграмма атмосферных выбросов прочих веществ на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2016-2021 гг.



Рисунок Б.34 - Диаграмма атмосферных выбросов прочих веществ на АО «Далур» за 2010-2021 гг.

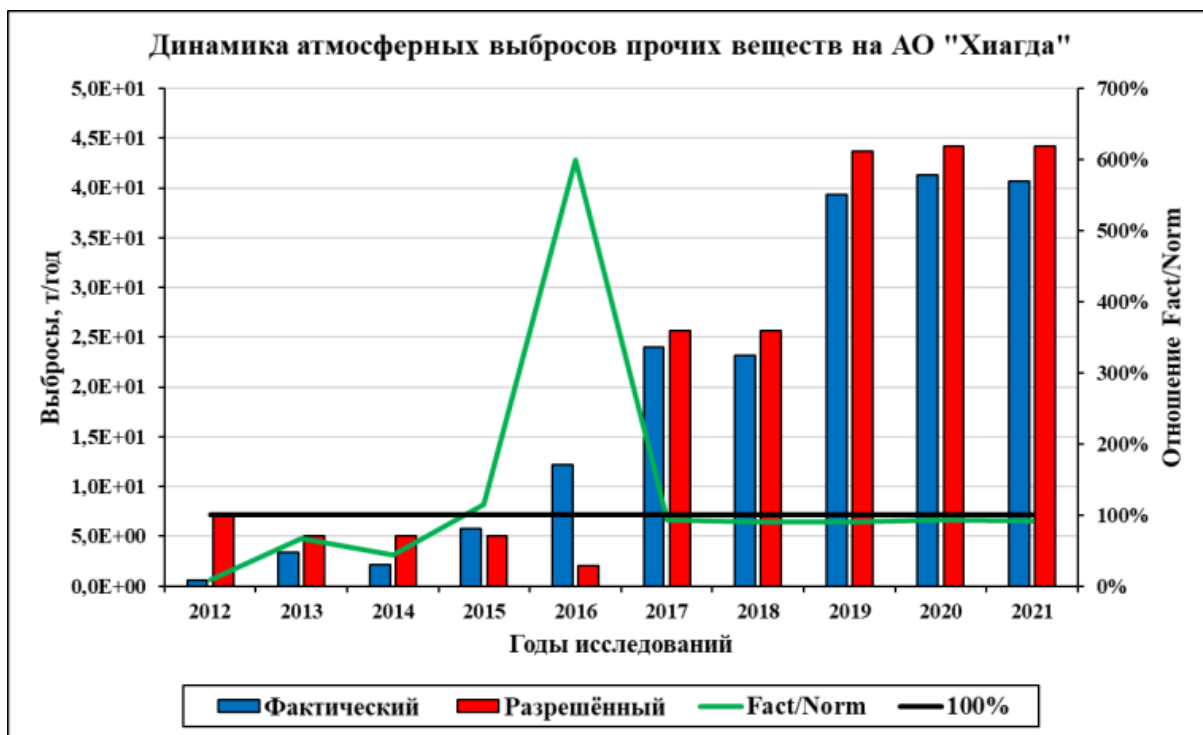


Рисунок Б.35 - Диаграмма атмосферных выбросов прочих веществ на АО «Хиагда» за 2012-2021 гг.

5.2. ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» и АО «Далур»

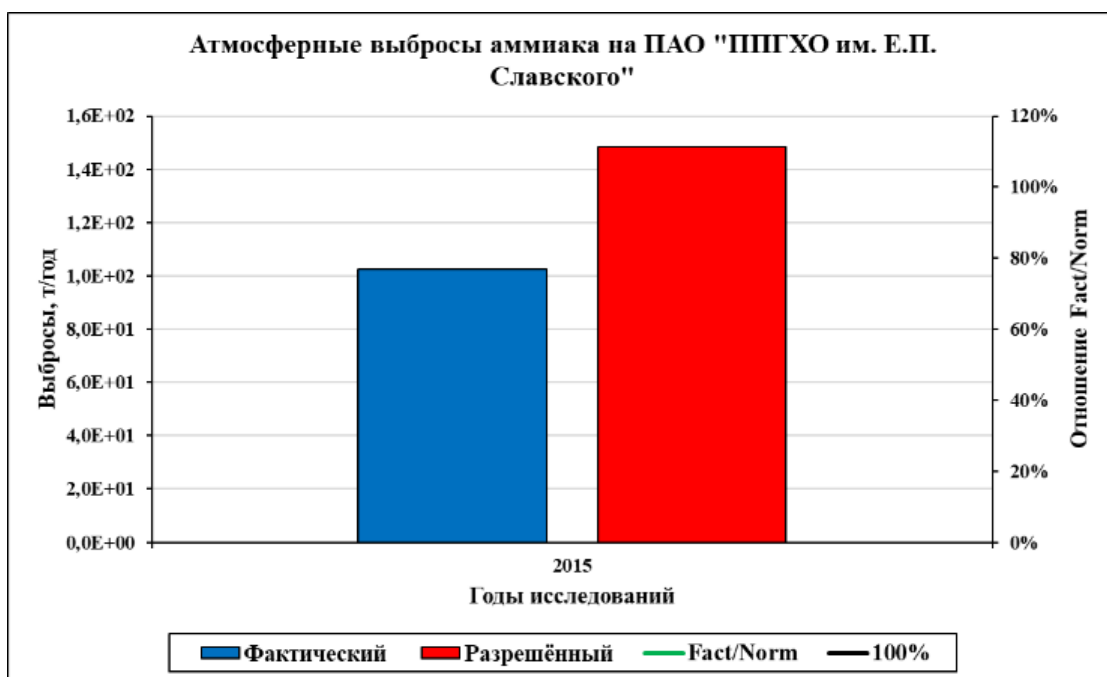


Рисунок Б.36 - Диаграмма атмосферных выбросов аммиака на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015 г.



Рисунок Б.37 - Диаграмма атмосферных выбросов аммиака на АО «Далур» за 2011-2021 гг.

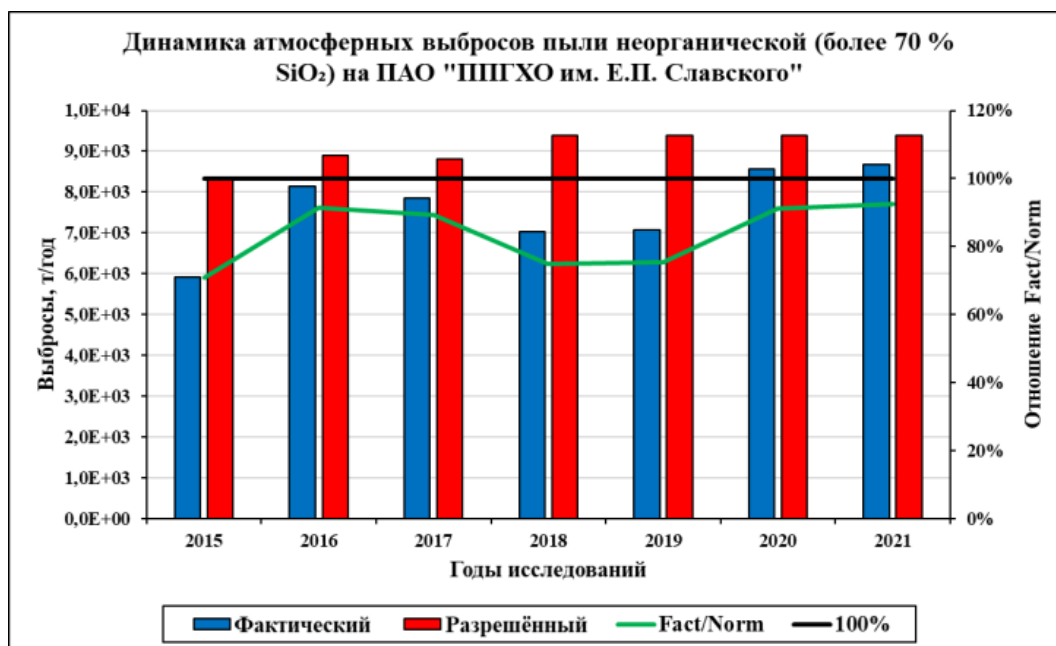


Рисунок Б.38 - Диаграмма атмосферных выбросов пыли неорганической (более 70 % SiO₂) на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

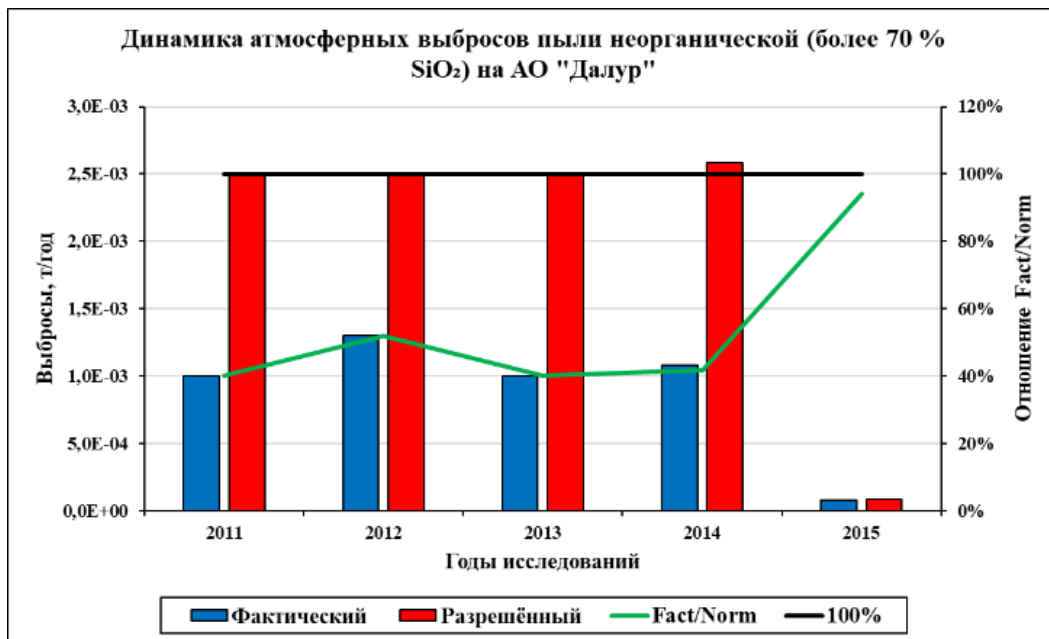


Рисунок Б.39 - Диаграмма атмосферных выбросов пыли неорганической (более 70 % SiO₂) на АО «Далур» за 2011-2015 гг.

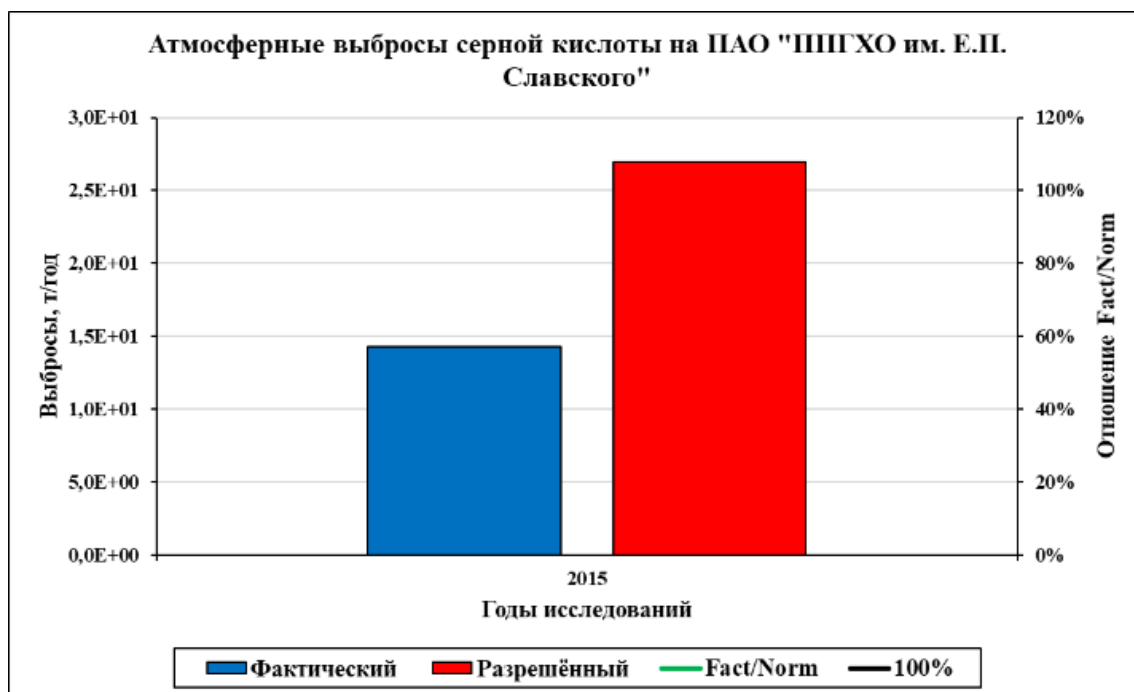


Рисунок Б.40 - Диаграмма атмосферных выбросов серной кислоты на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015 г.



Рисунок Б.41 - Диаграмма атмосферных выбросов серной кислоты на АО «Далур» за 2011-2021 гг.

5.3. ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» и АО «Хиагда»

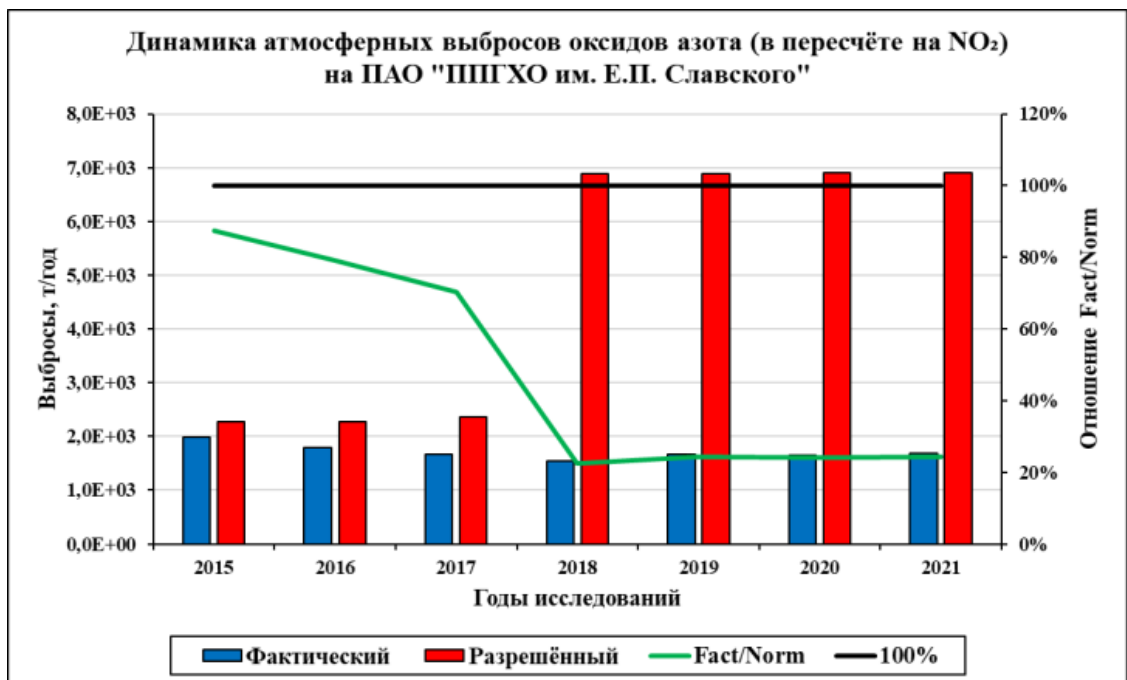


Рисунок Б.42 - Диаграмма атмосферных выбросов оксидов азота (в пересчёте на NO₂) на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015-2021 гг.

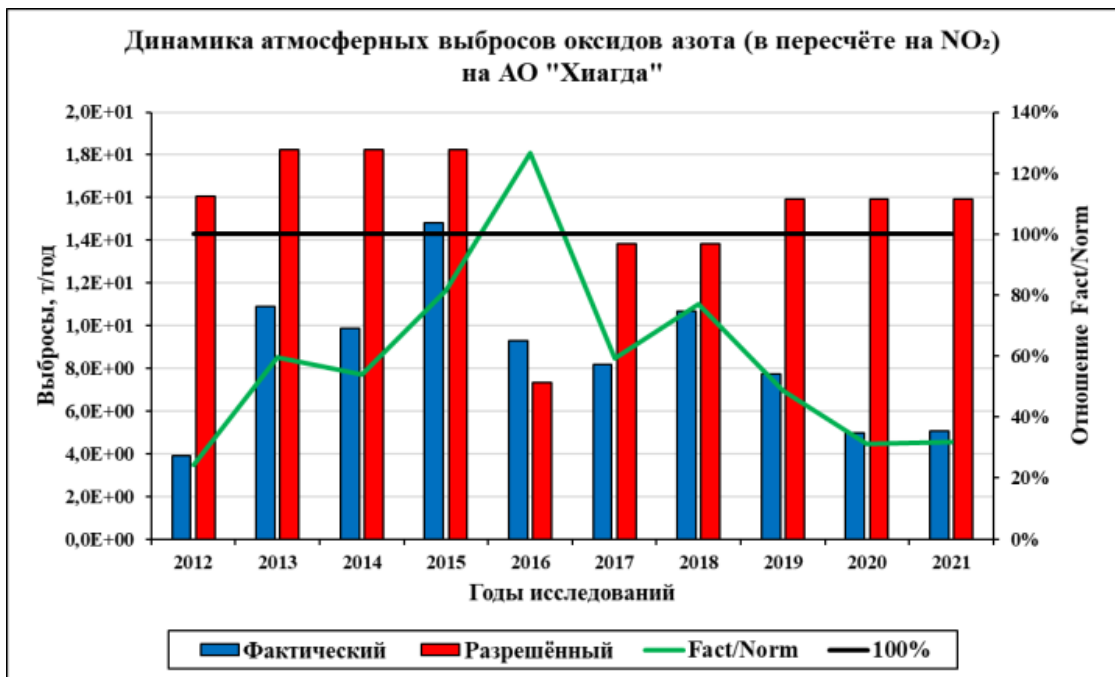


Рисунок Б.43 - Диаграмма атмосферных выбросов оксидов азота (в пересчёте на NO₂) на АО «Хиагда» за 2012-2021 гг.

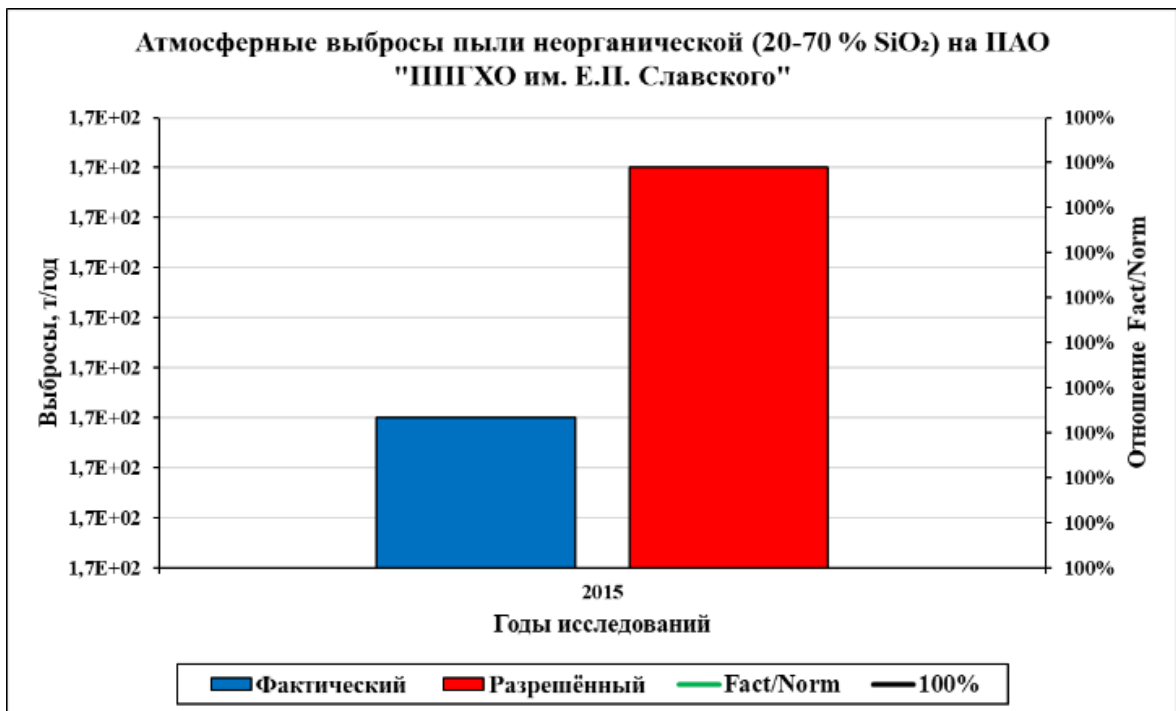


Рисунок Б.44 - Диаграмма атмосферных выбросов пыли неорганической (20-70 % SiO₂) на ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» за 2015 г.



Рисунок Б.45 - Диаграмма атмосферных выбросов пыли неорганической (20-70 % SiO₂) на АО «Хиагда» за 2017-2021 гг.

5.4. АО «Далур»

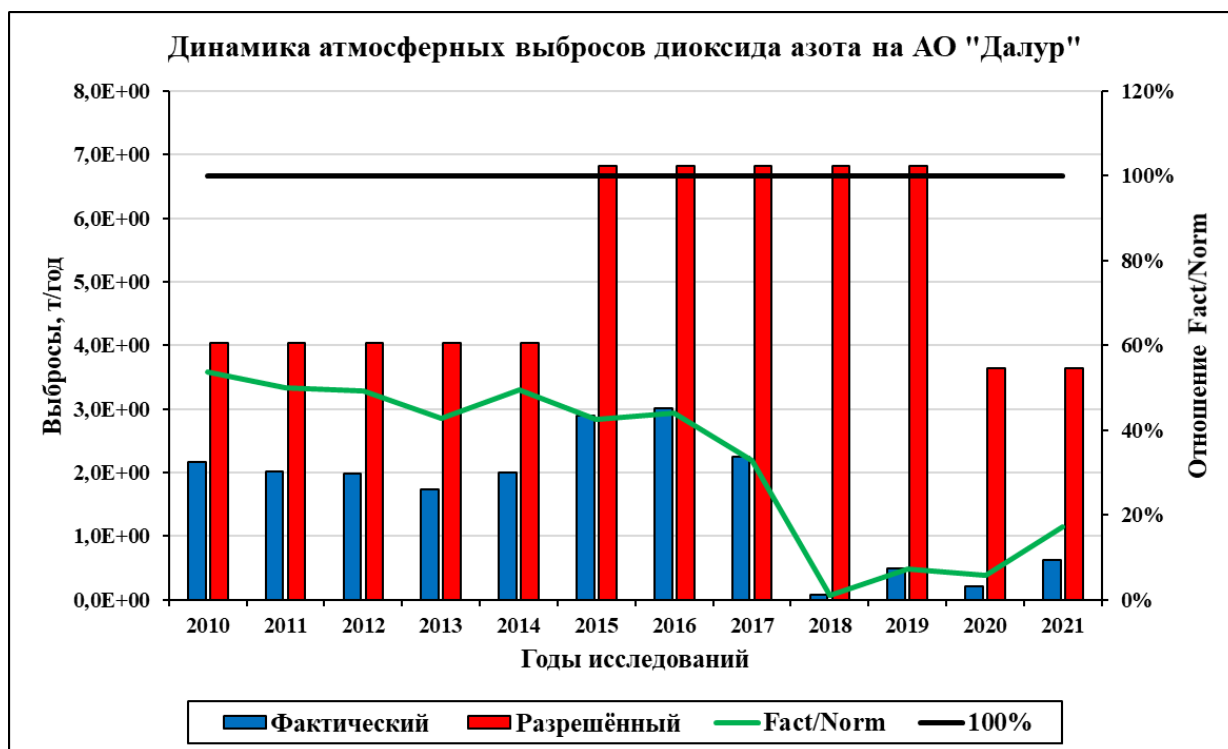


Рисунок Б.46 - Диаграмма атмосферных выбросов диоксида азота на АО «Далур» за 2010-2021 гг.

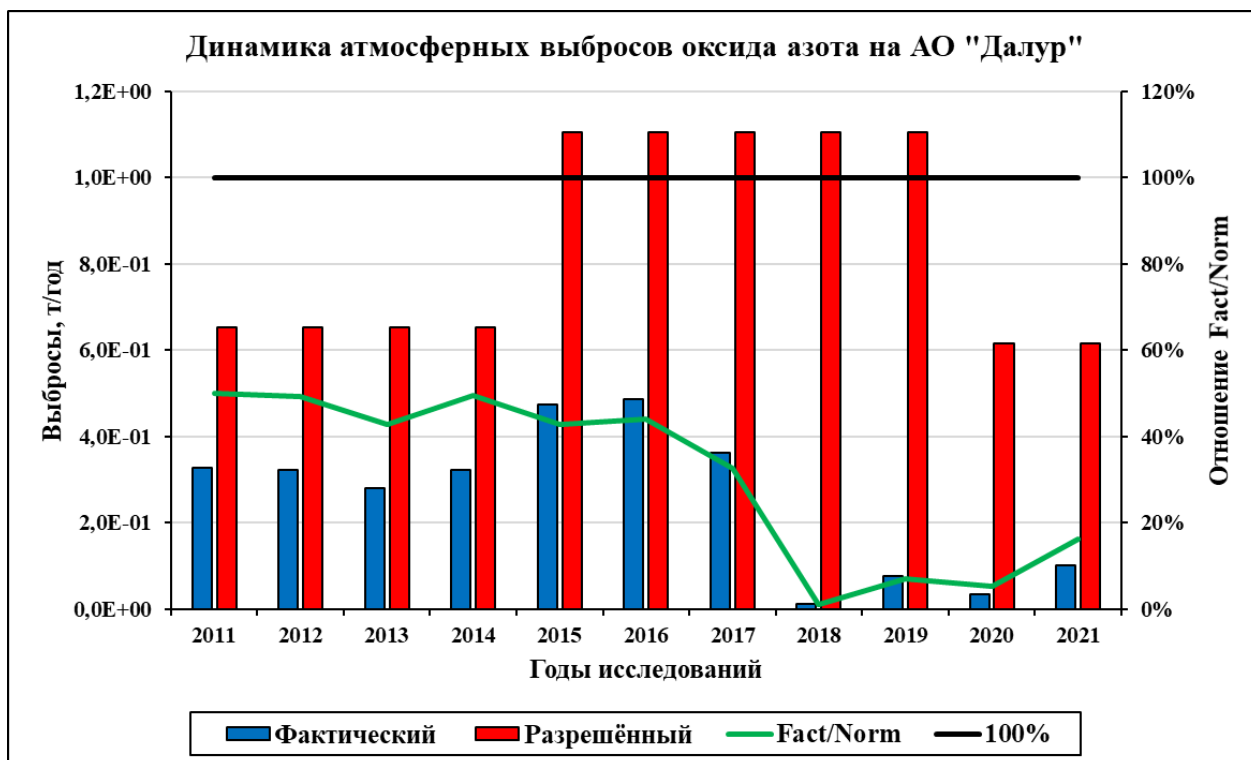


Рисунок Б.47 - Диаграмма атмосферных выбросов оксида азота на АО «Далур» за 2011-2021 гг.

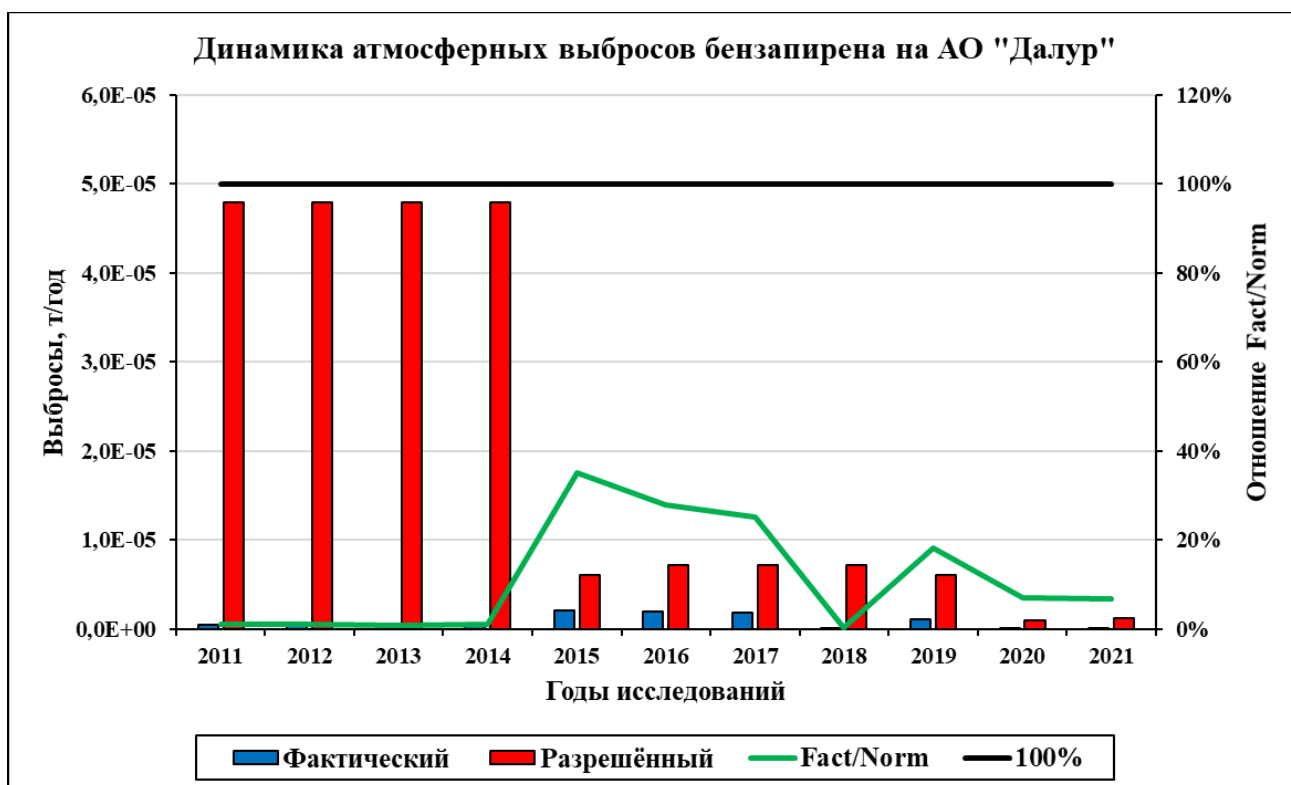


Рисунок Б.48 - Диаграмма атмосферных выбросов бензапирена на АО «Далур» за 2011-2021 гг.

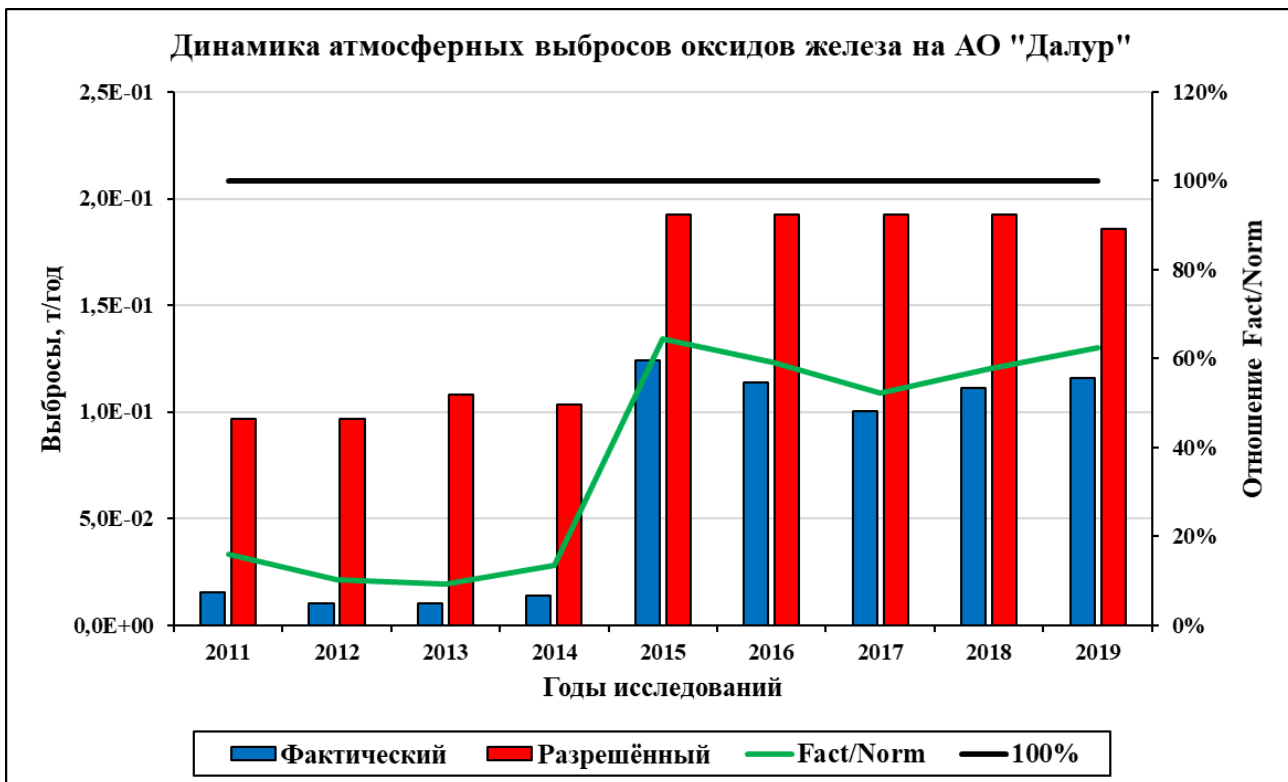


Рисунок Б.49 - Диаграмма атмосферных выбросов оксидов железа на АО «Далур» за 2011-2019 гг.

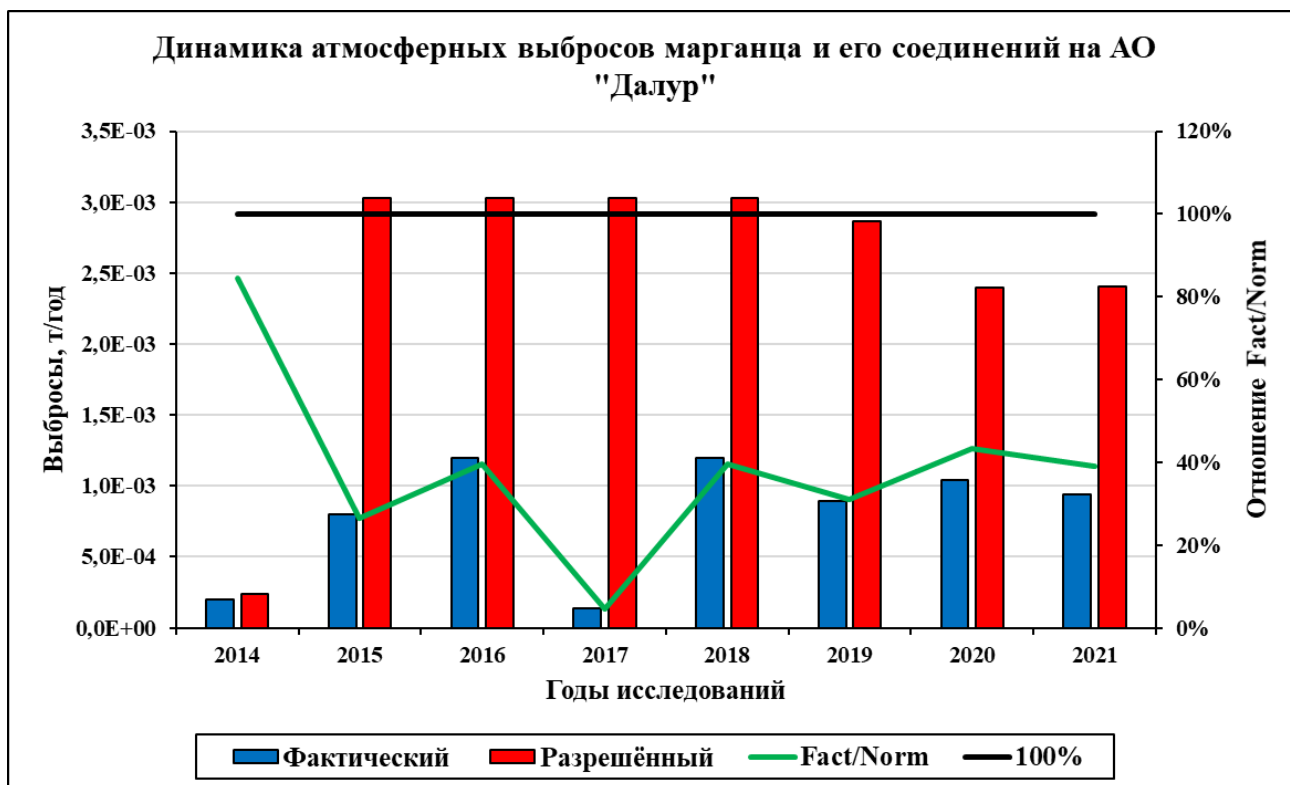


Рисунок Б.50 - Диаграмма атмосферных выбросов марганца и его соединений на АО «Далур» за 2014-2021 гг.

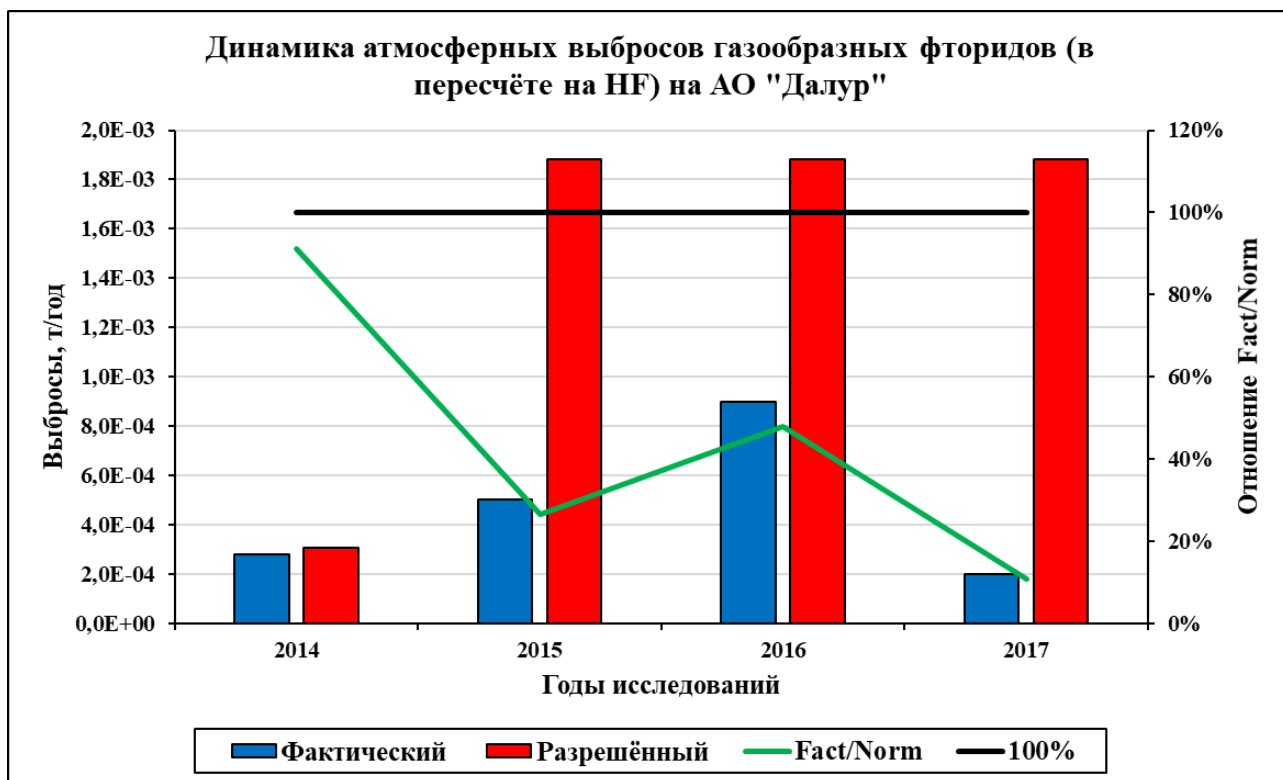


Рисунок. Б.51 - Диаграмма атмосферных выбросов газообразных фторидов (в пересчёте на HF) на АО «Далур» за 2014-2017 гг.

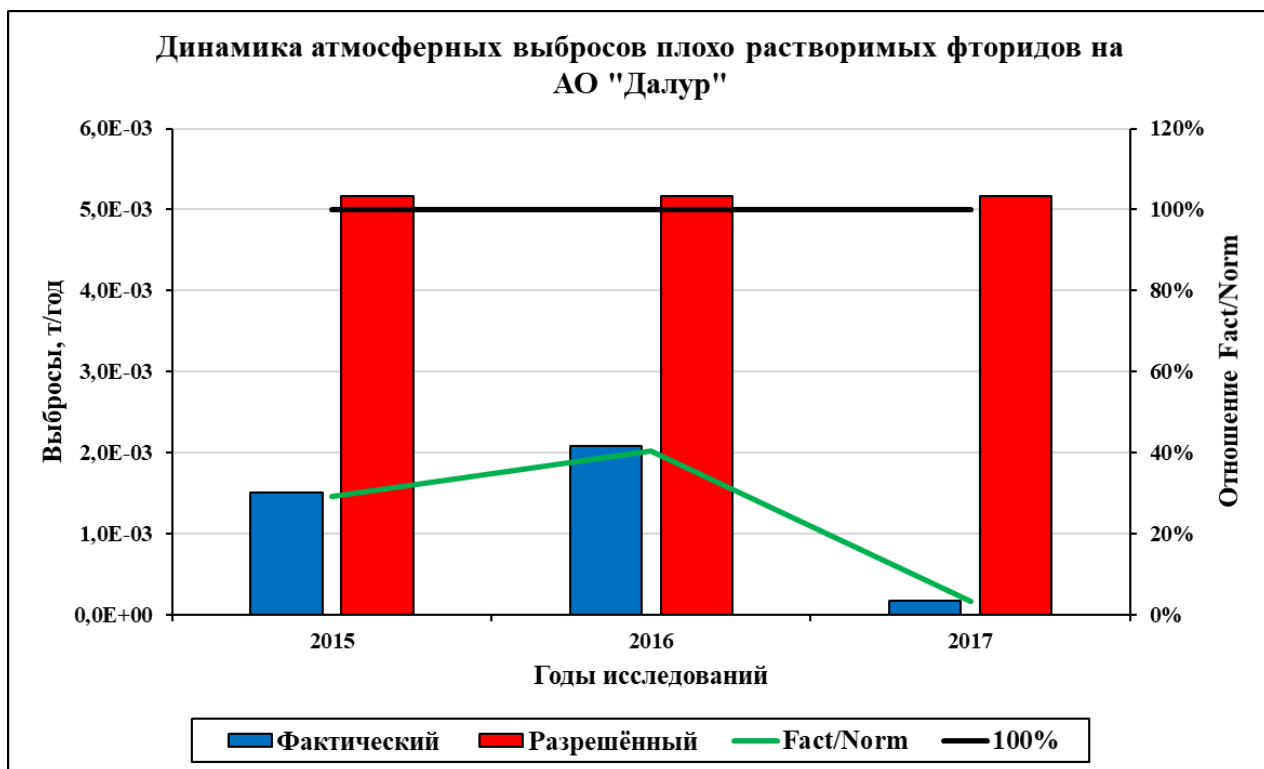


Рисунок Б.52 - Диаграмма атмосферных выбросов плохо растворимых фторидов на АО «Далур» за 2015-2017 гг.

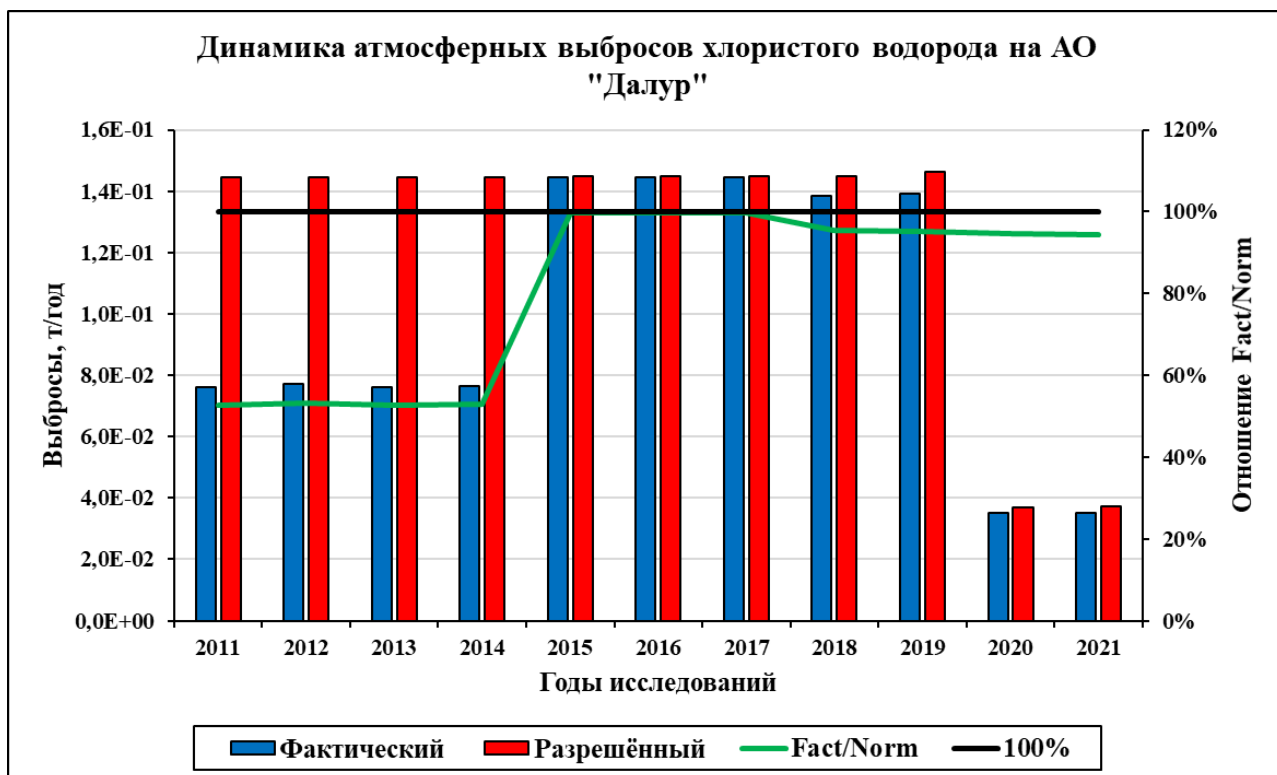


Рисунок Б.53 - Диаграмма атмосферных выбросов хлористого водорода на АО «Далур» за 2011-2021 гг.

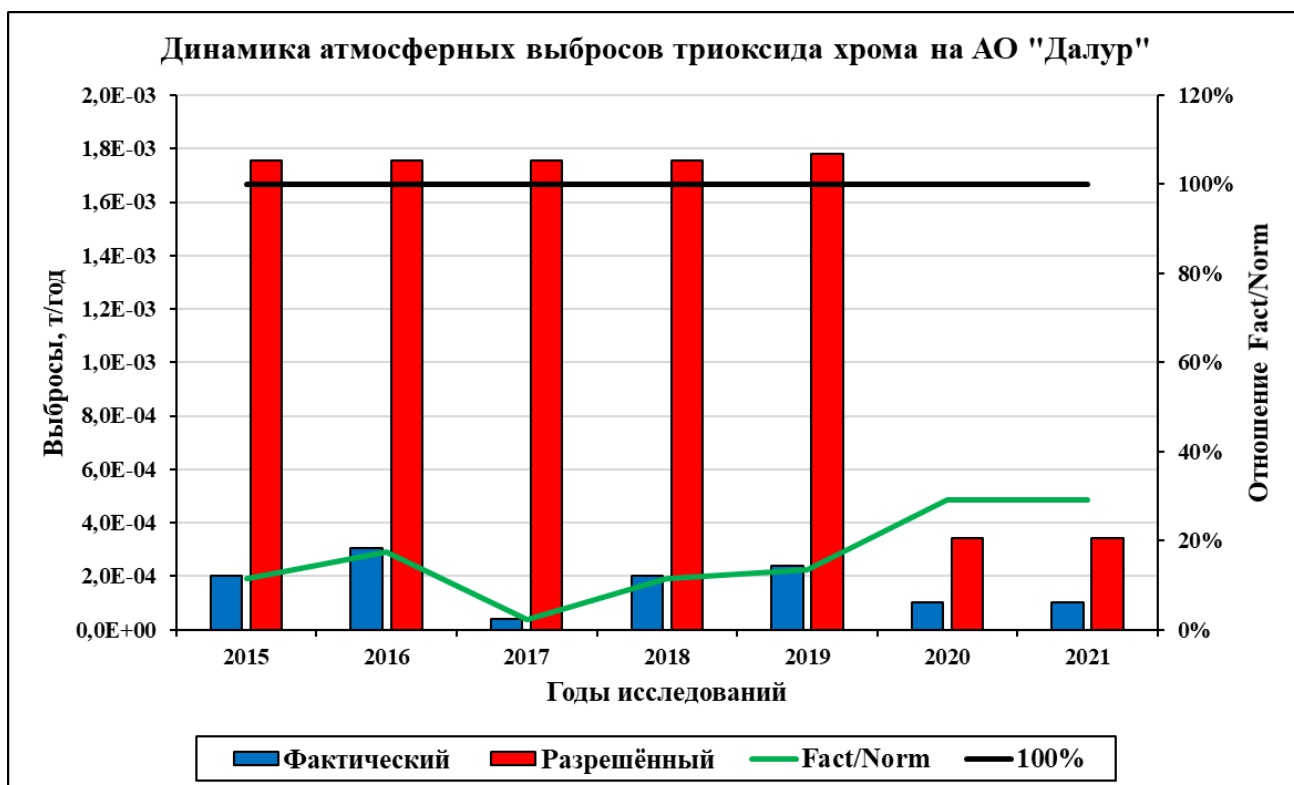


Рисунок Б.54 - Диаграмма атмосферных выбросов триоксида хрома на АО «Далур» за 2015-2021 гг.

5.5. АО «Хиагда»

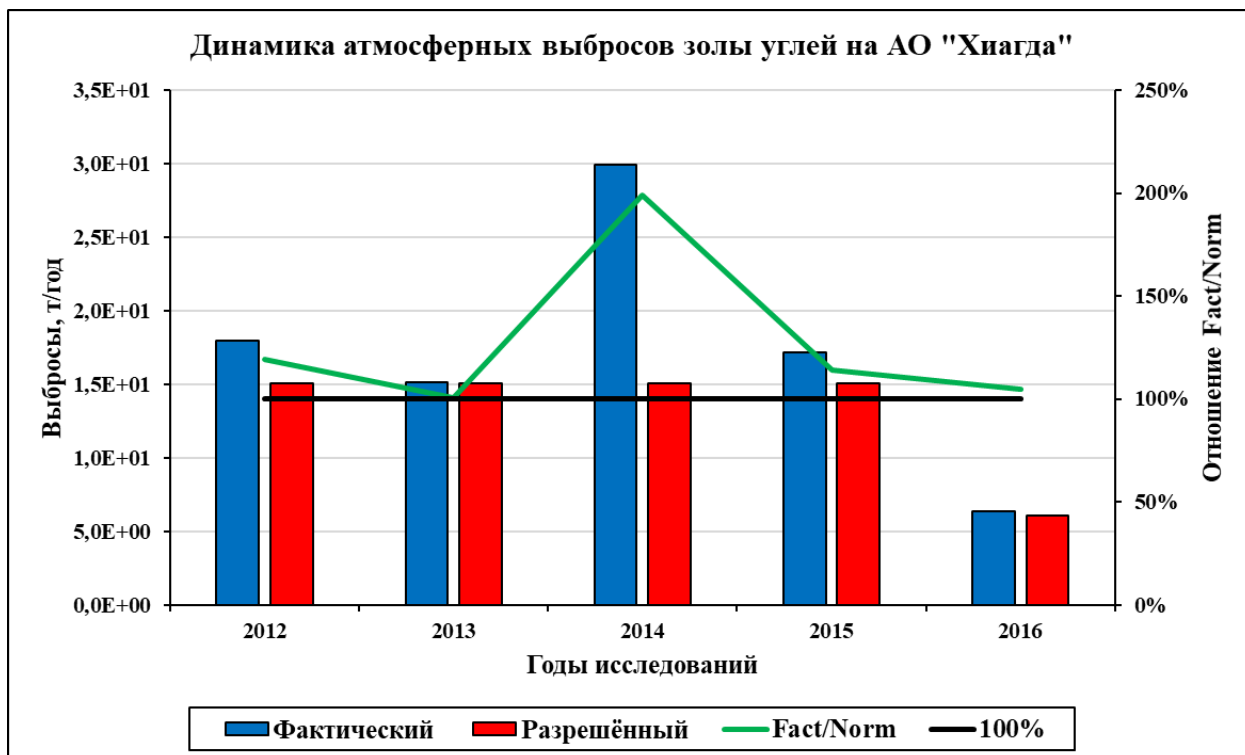


Рисунок Б.55 - Диаграмма атмосферных выбросов золы углей на АО «Хиагда» за 2012-2021 гг.

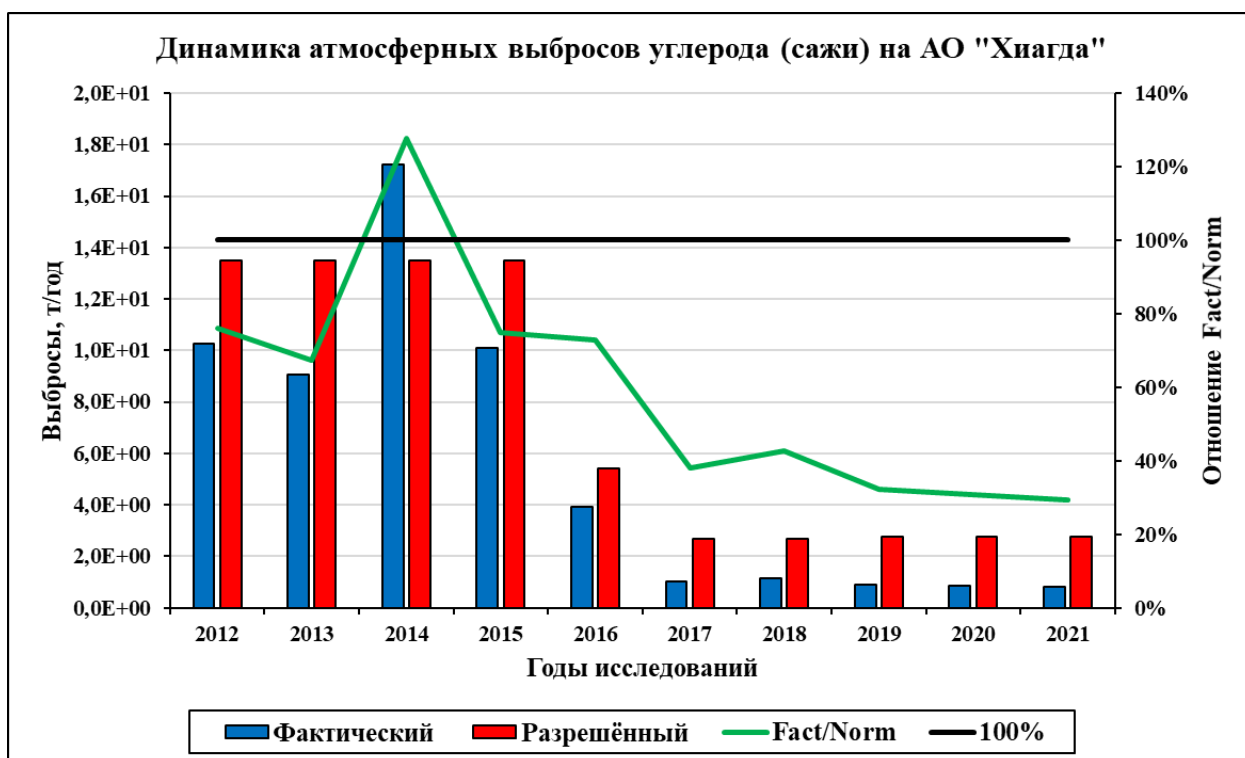


Рисунок Б.56 - Диаграмма атмосферных выбросов углерода (сажи) на АО «Хиагда» за 2012-2021 гг.