

ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Научно-практический журнал
ФГУП "ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "МАЯК"
Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом"

Издаётся с 1996 г., периодичность – 4 номера в год
№ 2 (106) 2022 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР Ю.Г. МОКРОВ
ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА И.Г. ТАНАНАЕВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.В. Аклеев, В.Н. Большаков, Л.А. Большов, В.И. Величкин,
Е.А. Демченко (отв. секретарь), М.В. Жуковский, И.А. Иванов, Л.А. Ильин,
С.Н. Калмыков, Д.Н. Колупаев, Н.А. Кошурникова, А.И. Крышев, А.А. Куваев,
И.И. Линге, М.В. Логунов, Б.Ф. Мясоедов, М.Г. Нагорная, М.И. Похлебаев,
Е.А. Пряхин, С.А. Романов, М.Э. Сокольников, А.В. Трапезников,
С.С. Уткин, А.П. Хомяков, В.Ф. Хохряков, С.В. Юдинцев

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Приветствие главного редактора | 3 |
| РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ | |
| Мокров Ю.Г., Мокров К.Ю., Антонова Т.А., Мурашова Е.Л. Основные результаты контроля радиоактивного загрязнения поверхностных водных объектов в зоне наблюдения ФГУП "ПО "Маяк" за 2021 год | 6 |
| Мокров Ю.Г., Исаева Н.Б., Яркова Т.А. Результаты контроля радиационной обстановки на территории зоны наблюдения ФГУП "ПО "Маяк" в 2021 году | 16 |
| Постовалова Г.А. Результаты мониторинга подземных вод на территории промышленной площадки ФГУП "ПО "Маяк" в 2021 году | 25 |
| Цивилёв И.В., Горлов О.В. Результаты гидрологического мониторинга ТКВ, проводимого ФГБУ "Гидроспецгеология" в 2021 году | 40 |
| Мокров Ю.Г., Мокров К.Ю., Дементьева А.Е. Результаты контроля выбросов в атмосферу радиоактивных веществ из организованных источников ФГУП "ПО "Маяк" в 2021 году | 51 |
| Мокров Ю.Г., Посохова А.А., Мокров К.Ю. Результаты мониторинга состояния специальных промышленных водоёмов ФГУП "ПО "Маяк" в 2021 году | 58 |

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Пряхин Е.А., Атаманюк Н.И., Перетыкин А.А., Тюхай М.В., Могильникова Н.И., Стяжкина Е.В., Обвинцева Н.А., Андреев С.С., Алдибекова А.Е., Мокров Ю.Г., Мокров К.Ю., Тряпицына Г.А. Апробация системы биологического мониторинга экосистем промышленных водоёмов ФГУП "ПО "Маяк" на примере водоёма В-4 | 70 |
| CONTENTS | 91 |
| ABSTRACTS | 93 |
| Сведения об авторах статей | 97 |

Журнал включён в перечень рецензируемых научных изданий, в которых
должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание
учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук.

Уважаемые читатели!

Комплексное решение задач обеспечения экологической безопасности действующих и выводимых из эксплуатации ядерных и радиационно опасных объектов является одним из важнейших условий устойчивого развития атомной промышленности в целом и ФГУП "ПО "Маяк" в частности. При этом результаты мониторинга радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды (ОС) являются основой обеспечения радиационной безопасности в районе расположения предприятия.

Этот выпуск журнала в какой-то мере можно считать экспериментальным, поскольку он практически полностью посвящён различным аспектам одного вопроса – радиационному контролю и мониторингу основных техногенных и природных объектов, расположенных вблизи ФГУП "ПО "Маяк".

При подготовке данного выпуска редакционная коллегия преследовала следующие цели:

- ознакомить читателей с действующей на предприятии комплексной системой радиационного контроля и мониторинга;
- обобщить и проанализировать основные результаты мониторинга, полученные в 2021 году;
- выявить основные тенденции и оценить значимость радиационных рисков.

Современная радиационная обстановка на обширной территории в районе расположения предприятия сформировалась в 1950–1960 годах в результате:

- регламентных и аварийных сбросов жидких радиоактивных отходов (ЖРО) радиохимического производства в открытую гидрографическую систему реки Течи;
- газоаэрозольных выбросов радионуклидов в атмосферу в период, когда на предприятии отсутствовали эффективные методы газоочистки;
- химического взрыва ёмкости с высокоактивными ЖРО радиохимического производства в 1957 году, приведшего к образованию Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) и др.

В результате радиоактивному загрязнению подверглись практически все составляющие наземной природной среды в районе предприятия. Поверхностная плотность радиоактивного загрязнения почвы промышленной площадки (ПП) характеризуется высоким и крайне неравномерным распределением ^{90}Sr (0,1–5000 Ки/км²), ^{137}Cs – (1–10000 Ки/км²), ^{239}Pu (0,1–30 Ки/км²). После реализации на ФГУП "ПО "Маяк" ряда крупных природоохранных мероприятий значения ОА ^{137}Cs и ^{90}Sr в атмосфере ближайших к предприятию населённых пунктов снизились до $\sim 1,0 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, а для ^{238}Pu и $^{239,240}\text{Pu}$ – до $\sim 1,0 \cdot 10^{-8}$ Бк/м³, что на 5–8 порядков величины меньше допустимой объёмной активности для населения (ДОН_{нас}). В настоящее время загрязнение атмосферы радионуклидами в районе расположения предприятия обусловлено в основном вторичным ветровым подъёмом с ранее загрязнённых территорий и определяется метеорологическими факторами (направлением и скоростью ветра, наличием растительности, степенью увлажнения почвы и др.).

В течение длительного периода часть образующихся на предприятии ЖРО направлялась на размещение в восемь водоёмов-хранилищ ЖРО, являющихся неотъемлемой частью технологического процесса:

- водоёмы оборотного водоснабжения В-2 (оз. Кызыл-Таш) и В-6 (оз. Татыш);
- водоёмы-хранилища низкоактивных ЖРО (НАО) В-3, В-4, В-10 и В-11, образующие Теченский каскад водоёмов (ТКВ);
- водоёмы-хранилища среднеактивных ЖРО (САО) В-9 (Карачай) и В-17 (Старое Болото).

Впоследствии эти водоёмы получили статус объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) – хранилищ ЖРО. В результате многолетней фильтрации жидких САО из водоёмов В-9 и В-17 под ПП предприятия сформировался обширный ореол загрязнённых подземных вод. При этом удельная активность (УА) подземных вод по ^{90}Sr достигает ~ 100 кБк/л, а площадь линзы загрязнённых вод в границах уровня вмешательства (УВ) составляет ~ 20 км².

Вышеуказанные особенности определяют особые требования к постановке задач и орга-

низации системы радиационного контроля и мониторинга (СРКМ) окружающей среды:

- сбор ретроспективных данных и получение новой информации о характеристиках загрязнения ОС с последующим анализом и обобщением;
- создание прогностических моделей поведения и миграции радионуклидов в объектах ОС и их верификация на основе накопленных данных;
- прогнозирование и своевременное выявление тенденций и трендов изменения радиационной обстановки;
- разработка рекомендаций по снижению негативного воздействия загрязнённых территорий на человека и биоту;
- оценка эффективности выполняемых реабилитационных мероприятий.

На ФГУП "ПО "Маяк" реализованы следующие виды наблюдений и контроля:

1. Гидрометеорологический контроль.
2. Радиационный контроль:
 - загрязнения объектов ОС (атмосфера, вода, почва, растительность, продукты питания и др.);
 - дозиметрической обстановки на загрязнённой территории;
 - поступления радионуклидов в атмосферу и водные объекты с регламентными и аварийными выбросами и сбросами;
 - состояния пунктов размещения твёрдых и жидких радиоактивных отходов (РАО) в рамках комплексного обследования.
3. Гидрологические наблюдения поверхностных вод.
4. Гидрогеологические наблюдения подземных вод.
5. Наблюдения и контроль состояния гидротехнических сооружений (ГТС).
6. Наблюдения за загрязнением водной и наземной (ВУРС) биоты.
7. Автоматизированный контроль радиационной обстановки (АСКРО).
8. Автоматизированный мониторинг технического состояния и радиационной обстановки на производственных объектах и при перевозке грузов (АСМЯРОГ).

В настоящее время на ФГУП "ПО "Маяк" эксплуатируется многоуровневая система производственного экологического контроля (ПЭК) и СРКМ. Наблюдения осуществляются наПП, границы которой совпадают с границами санитарно-защитной зоны (СЗЗ), и в зоне наблюдения (ЗН). Контроль радиоэкологической обстановки проводится в соответствии с утверждённой программой, в которой установлен объём и периодичность радиационного контроля, определены пункты отбора проб. В настоящее время общее число пунктов контроля (все среды) превышает 700, а число проб-определений в аналитических лабораториях предприятия, обеспечивающих измерения СРКМ, превышает несколько десятков тысяч в год. Общее представление о масштабах действующей СРКМ приведено в публикациях:

- "Становление и развитие комплексной системы мониторинга радиоактивного загрязнения окружающей среды в районе расположения ФГУП "ПО "Маяк" // Вопросы радиационной безопасности. – 2015. – № 2. – С. 3–15;
- "Мониторинг – основа обеспечения безопасности при выполнении работ по консервации водоёма Карачай" // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 3(4). – С. 60–68.

Радиоэкологический контроль осуществляет специальная служба предприятия, аккредитованная в системе радиационного контроля. В рамках ПЭК в лабораторных условиях с использованием ядерно-физических, физико-химических, химических и радиохимических методов определяется содержание радиоактивных и вредных загрязняющих веществ в отобранных пробах.

Гидрологический и гидрогеологический мониторинг состояния поверхностных и подземных вод проводится совместно со специалистами ФГБУ "Гидроспецгеология". Для проведения стационарных гидрологических наблюдений на контролируемых водных объектах оборудованы гидрологические створы и водомерные посты, на которых измеряются уровни и расходы воды, производится отбор проб. Многолетний контроль за гидродинамическим и гидрохимическим состоянием подземной гидросферы осуществляется по сети наблюдательных скважин (более 500)

путём регулярных наблюдений за уровнем подземных вод и их химического и радиохимического состава. Эти исследования позволили обосновать многопараметрическую физическую модель миграции загрязнения в подземных водах от поверхностных хранилищ ЖРО – водоёмов В-9 и В-17, – которая стала основой для математического описания процесса миграции химических компонентов и радионуклидов в подземных водах. Результаты прогнозных расчётов используются как для принятия оперативных управляющих, так и стратегических решений, направленных на снижение риска загрязнения ОС.

Комплексный экологический мониторинг состояния водной биоты специальных промышленных водоёмов ФГУП "ПО "Маяк" (хранилищ ЖРО) проводится совместно с учёными Уральского научно-практического центра радиационной медицины (ФГБУН УНПЦ РМ ФМБА России).

Радиоэкологический мониторинг состояния наземной биоты и специализированные научно-исследовательские работы на территории головной части ВУРСа на протяжении более 20 лет проводятся Институтом экологии растений и животных УрО РАН (ИЭРиЖ).

Контроль загрязнения сельскохозяйственной продукции и продуктов питания проводится совместно с МРУ № 71 ФМБА. Объектами контроля являются основные компоненты рациона питания населения: рыба, мясо, молоко, картофель и др.

Актуальность и достоверность информационного насыщения задач по обоснованию безопасности жизненного цикла пунктов хранения РАО и других объектов использования атомной энергии, расположенных на территории ФГУП "ПО "Маяк", требуют постоянного подтверждения и анализа.

Главный редактор Ю. Мокров

УДК 621.039.553.5+502.55

© 2022

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ РАДИОАКТИВНОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ
В ЗОНЕ НАБЛЮДЕНИЯ ФГУП "ПО "МАЯК" ЗА 2021 ГОД**

*Ю.Г. Мокров, К.Ю. Мокров, Т.А. Антонова, Е.Л. Мурашова
Россия, г. Озёрск, ФГУП "ПО "Маяк"*

Приведено краткое описание гидрографической системы р. Течи, а также характеристики основных водоёмов и водотоков, расположенных в районе ФГУП "ПО "Маяк". Указаны основные параметры системы мониторинга и контроля радиоактивного загрязнения водоёмов и водотоков зоны наблюдения (ЗН) ФГУП "ПО "Маяк". Результаты контроля поверхностных водных объектов 2021 г. приведены в сравнении с 2019–2020 гг. Показано, что радиоактивное загрязнение поверхностных водных объектов (ВО) ЗН значительно ниже уровня вмешательства (УВ) и контрольных уровней (КУ). Сброс радионуклидов в открытую гидрографическую систему р. Течи составил около 1 % от установленного норматива допустимых сбросов (ДС).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: РЕКА ТЕЧА, ОБЪЁМНАЯ АКТИВНОСТЬ, ^{90}Sr , ФИЛЬТРАЦИЯ, ВОДНЫЙ И РАДИОАКТИВНЫЙ СТОК

ФГУП "ПО "Маяк" и город Озёрск расположены на водосборной площади р. Течи. В 1950-е годы гидрографическая система верховья р. Течи претерпела значительные изменения, связанные с радиоактивным загрязнением реки и строительством Теченского каскада водоёмов (ТКВ), системы обводных каналов и ряда других гидротехнических сооружений (ГТС). Водоёмы ТКВ (В-3, В-4, В-10 и В-11) признаны объектами использования атомной энергии (ОИАЭ) – поверхностными водоёмами-хранилищами жидких радиоактивных отходов (ВХ ЖРО) – и являются потенциальными источниками радиоактивного загрязнения окружающей среды. В настоящее время р. Теча в верховье направлена по искусственному руслу – левобережному обводному каналу (ЛБК) в обход ТКВ (рисунок), – а далее река течёт по своему естественному руслу до впадения в р. Исеть.

Левобережный канал предназначен для отведения сточных вод с очистных сооружений г. Озёрска и ФГУП "ПО "Маяк", поверхностно-склонового водного стока и избыточных вод из озёр Иртышско-Каслинской системы (ИКС) в р. Течу, минуя ТКВ. Небольшая река Мишеляк (~15 км) берёт своё начало из болот

севернее оз. Улагач и принимает очищенные хозяйственно-бытовые сточные воды посёлка Новогорный и сбросы системы гидрозолоудаления Аргаяшской ТЭЦ. Правобережный канал (ПБК) является искусственным продолжением русла р. Мишеляк и предназначен для отведения водного стока в р. Течу в обход водоёмов ТКВ. Консольные водосбросы ЛБК и ПБК являются выпуском поверхностно-склоновых и сточных вод ФГУП "ПО "Маяк" в открытую гидрографическую систему р. Течи и оформлены как выпуск № 7 сточных вод.

На режим водного стока по ЛБК оказывает существенное влияние наличие в среднем и нижнем течении ЛБК трёх логов с общей водосборной площадью около 80 км². В летнее время в логах происходит аккумуляция воды и её последующее испарение. Водный сток по ЛБК определяется следующими источниками:

- попуски воды из оз. Иртыш в многоводные периоды;
- атмосферные осадки и испарение с поверхности воды каналов и логов;
- сброс хозяйственно-бытовых сточных вод г. Озёрска и ФГУП "ПО "Маяк";

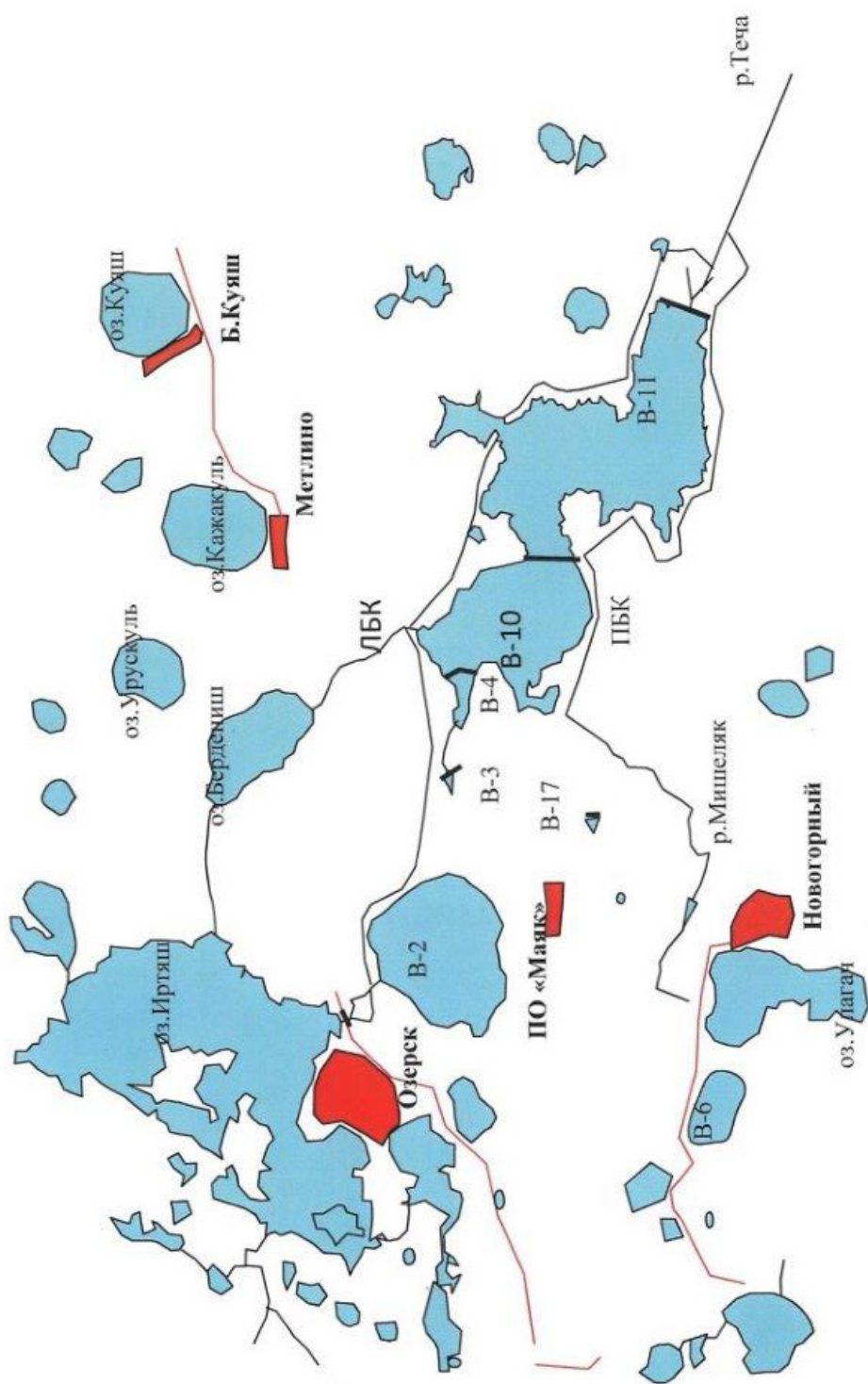


Рисунок. Карта-схема расположения пунктов контроля ВО и ОИАЭ – ВХЖРО

- поверхностный сток с водосборной территории;
 - грунтовый приток и отток.
- Основные источники водного питания ПБК:
- водный сток р. Мишеляк;
 - поверхностный сток с водосборной территории;
 - атмосферные осадки и испарение с поверхности воды;
 - грунтовый приток и отток.

Озёра Бердениш, Кожаккуль, Кирпичики, Алабуга, Урускүль – естественные озёра, расположенные на территории Восточно-уральского радиоактивного следа (ВУРС) и имеющие повышенное радиоактивное загрязнение в результате аварии 1957 г. на ФГУП "ПО "Маяк". Река Караболка берёт начало из болота Бугай, которое расположено на загрязнённой территории ВУРС.

В 2021 г. контроль радиоактивного загрязнения воды поверхностных водоёмов и водотоков на территории промышленной площадки и ЗН ФГУП "ПО "Маяк" проводился в соответствии с программой [1] с целью оценки параметров источника поступления радионуклидов из действующих ОИАЭ в открытую гидрографическую сеть и для изучения динамики самоочищения ВО, загрязнённых ранее (в 1950-х годах). Для проведения стационарных гидрологических наблюдений на контролируемых ВО оборудованы гидрологические створы и водомерные посты, на которых измеряются уровни и расходы воды, производится отбор проб воды. Измерение объёмной активности (ОА) радионуклидов в водных пробах проводится в аккредитованной лаборатории центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ) ФГУП "ПО "Маяк". Диапазон методики измерений радионуклидов составляет:

- ^{90}Sr – от $3,0 \cdot 10^{-2}$ до $1,1 \cdot 10^7$ Бк/дм³ с погрешностью измерений от 30 до 50 % [2, 3];
- ^{137}Cs – от 0,3 до $3,5 \cdot 10^{10}$ Бк/дм³ с погрешностью измерений от 20 до 50 % [4];
- тритий – от 30 до $2,6 \cdot 10^9$ Бк/дм³ с погрешностью измерений от 15 до 49 % [5].

На рисунке приведена карта-схема расположения действующих ОИАЭ – поверхностных водоёмов-хранилищ жидких радиоактивных отходов (ВХ ЖРО) и контролируемых ВО (каналы, озёра, реки).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Левобережный канал

Результаты измерений ОА цезия-137 (^{137}Cs), стронция-90 (^{90}Sr) и трития (^3T) в воде на консольном сбросе ЛБК за 2021 г. в сравнении с 2020 и 2019 гг. приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, среднемесячные значения ОА ^{90}Sr в воде на консольном сбросе ЛБК в течение года изменялись в диапазоне от менее 0,03 до 0,84 Бк/дм³. Среднегодовое значение ОА ^{90}Sr в 2021 г. по сравнению с 2020 г. возросло в полтора раза и составило 0,48 Бк/дм³, но осталось на порядок величины ниже значения УВ [6]. ОА трития в воде ЛБК изменялась в диапазоне от 140 до 280 Бк/дм³ и незначительно снизилась по сравнению с 2020 г. ОА ^{137}Cs в воде ЛБК была ниже минимальной детектируемой активности (МДА).

Река Мишеляк и ПБК

В табл. 2 приведены результаты измере-

Таблица 1

Объёмная активность радионуклидов в воде на консольном сбросе ЛБК, Бк/дм³

| Дата отбора | Радионуклид | | |
|---------------------|------------------|--------------|-------------------|
| | ^{90}Sr | ^3T | ^{137}Cs |
| Январь | 0,24 | 220 | <0,47 |
| Февраль | 0,84 | 200 | <0,49 |
| Март | 0,41 | 170 | <0,47 |
| Апрель | 0,77 | 280 | <0,48 |
| Май | 0,32 | 150 | <0,50 |
| Июнь | 0,61 | 140 | <0,50 |
| Июль | 0,56 | 170 | <0,60 |
| Август | 0,28 | 160 | <0,70 |
| Сентябрь | < 0,03 | 190 | <0,50 |
| Октябрь | 0,71 | 210 | <0,48 |
| Ноябрь | 0,43 | 240 | <0,50 |
| Декабрь | 0,59 | 250 | <0,50 |
| Средняя за 2021 год | 0,48 | 200 | <0,52 |
| Средняя за 2020 год | 0,32 | 230 | <0,52 |
| Средняя за 2019 год | 1,49 | 200 | <0,43 |

Таблица 2

Объёмная активность радионуклидов в воде на выходном створе р. Мишеляк
и на консольном сбросе ПБК, Бк/дм³

| Дата отбора | р. Мишеляк | | | ПБК | | |
|---------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|
| | ⁹⁰ Sr | ³ T | ¹³⁷ Cs | ⁹⁰ Sr | ³ T | ¹³⁷ Cs |
| Январь | 0,04 | 73 | <3,0 | 1,1 | 76 | <0,5 |
| Февраль | 0,36 | 70 | <3,4 | 0,9 | 730 | <0,5 |
| Март | 0,29 | 59 | <3,3 | 1,4 | 65 | <0,5 |
| Апрель | 0,16 | 60 | <3,3 | 3,3 | 51 | <0,5 |
| Май | 0,049 | < 40 | <3,9 | 0,9 | 52 | <0,5 |
| Июнь | 0,16 | 49 | <3,6 | 1,8 | 59 | <0,5 |
| Июль | <0,03 | 84 | <3,8 | 4,2 | 96 | <0,6 |
| Август | 0,05 | < 40 | <2,4 | 1,0 | 110 | <0,7 |
| Сентябрь | 0,04 | 137 | <3,7 | 2,0 | 161 | <0,5 |
| Октябрь | 0,33 | 120 | <4,0 | 2,9 | 142 | <0,5 |
| Ноябрь | 0,47 | 80 | <3,8 | 2,1 | 140 | <0,5 |
| Декабрь | 0,15 | 80 | <1,2 | 15 | 86 | <0,5 |
| Среднее за 2021 год | 0,21 | 74 | <3,3 | 3,1 | 147 | <0,5 |
| Среднее за 2020 год | 0,21 | 102 | <2,8 | 3,8 | 118 | <0,6 |
| Среднее за 2019 год | 0,18 | 78 | <2,9 | 5,7 | 113 | <0,4 |

ний ОА ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и трития в воде на выходном створе р. Мишеляк и консольном сбросе ПБК за 2021 г. Все измеренные значения ОА всех радионуклидов в воде р. Мишеляк оказались значительно ниже УВ [6], а среднегодовые значения в пределах погрешности измерений равны соответствующим результатам 2019 и 2020 гг.

Значения ОА ⁹⁰Sr в воде ПБК изменялись в диапазоне значений от 0,9 Бк/дм³ (весенний паводок) до 15 Бк/дм³ (зимняя межень), причём среднегодовое значение ОА ⁹⁰Sr в воде ПБК составило 3,1 Бк/дм³, что соответствует уровню 2020 г. В 2021 г. ОА трития в воде ПБК изменялась в диапазоне от 51 до 730 Бк/дм³, а среднегодовое значение осталось на уровне 2020 г. Все результаты измерений ОА ¹³⁷Cs в воде ПБК оказались ниже МДА.

Оценка радиоактивного стока на консольном сбросе ЛБК и ПБК

Специалисты-гидрологи ФГУП "ПО "Маяк" проводят регулярные измерения рас-

ходов воды на консольном сбросе ЛБК и ПБК и расчёт водного стока за каждый месяц. Данные по водному и радиоактивному стоку ЛБК и ПБК за 2021 г. приведены в табл. 3 и 4.

В 2021 г. объём водного стока ЛБК определялся объёмом сбросов с очистных сооружений г. Озёрска. Попуск воды из оз. Иртыш не проводился, сбросы с очистных сооружений ФГУП "ПО "Маяк" не осуществлялись. Водный сток на консольном водосбросе ЛБК был ниже стока 2020 г. и составил 9,03 млн м³.

Радиоактивное загрязнение ЛБК происходит в основном за счёт поверхностного стока с площади водосбора (ВУРС) и фильтрации воды из ТКВ через боковые дамбы.

В 2021 г. по сравнению с 2020 г. сток ⁹⁰Sr по ЛБК увеличился в полтора раза и составил 4,9 ГБк. Сток трития по ЛБК в 2021 г. снизился в полтора раза по сравнению с 2020 г. и составил 1880 ГБк. Сток ¹³⁷Cs по ЛБК остался на уровне 2019–2020 гг. и не превысил 5,3 ГБк.

В 2021 г. водный сток на консольном водосбросе ПБК был на 8 % выше, чем в 2020 г., и составил 5,68 млн м³. Радиоактивное загряз-

Таблица 3

Водный и радиоактивный сток на консольном сбросе ЛБК

| Месяц | Водный сток, млн м ³ | Радиоактивный сток, ГБк (Ки) | | |
|-------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------|-------------------|
| | | ⁹⁰ Sr | ³ T | ¹³⁷ Cs |
| Январь | 0,91 | 0,22 | 200 | <0,43 |
| Февраль | 0,99 | 0,83 | 200 | <0,49 |
| Март | 1,77 | 0,73 | 290 | <0,83 |
| Апрель | 2,02 | 1,55 | 570 | <0,97 |
| Май | 1,02 | 0,33 | 160 | <0,51 |
| Июнь | 0,57 | 0,35 | 80 | <0,29 |
| Июль | 0,24 | 0,13 | 40 | <0,14 |
| Август | 0,16 | 0,05 | 25 | <0,11 |
| Сентябрь | 0,10 | < 0,01 | 20 | <0,50 |
| Октябрь | 0,13 | 0,10 | 30 | <0,48 |
| Ноябрь | 0,29 | 0,13 | 70 | <0,15 |
| Декабрь | 0,83 | 0,48 | 210 | <0,42 |
| Всего за 2021 год | 9,03 | 4,9 (0,13) | 1880 (51) | <5,3 (0,14) |
| Всего за 2020 год | 11,8 | 3,0 (0,08) | 2730 (74) | <6,0 (0,16) |
| Всего за 2019 год | 13,1 | 20,0 (0,54) | 2640 (72) | <5,6 (0,15) |

Таблица 4

Водный и радиоактивный сток на консольном сбросе ПБК

| Месяц | Водный сток, млн м ³ | Радиоактивный сток, ГБк (Ки) | | |
|-------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------|-------------------|
| | | ⁹⁰ Sr | ³ T | ¹³⁷ Cs |
| Январь | 0,27 | 0,29 | 21 | <0,13 |
| Февраль | 0,24 | 0,22 | 180 | <0,12 |
| Март | 0,32 | 0,45 | 21 | <0,15 |
| Апрель | 1,01 | 3,33 | 52 | <0,48 |
| Май | 0,83 | 0,73 | 43 | <0,42 |
| Июнь | 0,72 | 1,30 | 43 | <0,36 |
| Июль | 0,62 | 2,60 | 60 | <0,37 |
| Август | 0,57 | 0,56 | 63 | <0,40 |
| Сентябрь | 0,16 | 0,33 | 26 | <0,08 |
| Октябрь | 0,36 | 1,05 | 51 | <0,17 |
| Ноябрь | 0,31 | 0,65 | 59 | <0,47 |
| Декабрь | 0,27 | 4,05 | 33 | <0,43 |
| Всего за 2021 год | 5,68 | 15,6 (0,42) | 645 (17,4) | <3,6 (0,10) |
| Всего за 2020 год | 5,26 | 21,0 (0,57) | 548 (14,8) | <2,9 (0,08) |
| Всего за 2019 год | 4,95 | 30,1 (0,81) | 528 (14,3) | <2,2 (0,06) |

нение воды ПБК происходит за счёт поверхностного стока с площади водосбора, за счёт фильтрации воды из ТКВ через боковые дамбы и за счёт поступления радионуклидов с водами р. Мишеляк.

Радиоактивный сток ^{90}Sr на консольном сбросе ПБК в 2021 г. по сравнению с 2020 г. снизился на 30 % и составил 15,6 ГБк (0,42 Ки). Сток трития в 2021 г. незначительно повысился (на 18 %) по сравнению с 2020 г. и составил 645 ГБк. Сток ^{137}Cs по ПБК не превысил 3,6 ГБк (0,10 Ки).

На ФГУП "ПО "Маяк" поступление загрязнённой радионуклидами воды в открытую гидрографическую систему р. Течи оформлено как выпуск № 7. Водный и радиоактивный сток по выпуску № 7 рассчитан как сумма соответствующего стока на консольных водосбросах ЛБК и ПБК. На период 2019–2025 гг. по выпуску № 7 были установлены нормативы допустимых сбросов (ДС) ^{90}Sr в р. Течу [7]. Получено разрешение УМТУ на сброс ^{90}Sr в количестве 1,95 ТБк/год [8]. Получено решение Министерства имущества и природных ресурсов Челябинской области о предоставлении р. Течи в пользование для сброса сточных вод в объёме 200 млн м³/год [9]. В 2021 г. объём водного стока по выпуску № 7 снизился примерно на 10 % по сравнению с 2020 г. за счёт низкой водности 2021 г. и составил 14,7 млн м³ (7,4 % от разрешённого объёма сброса). Фактический сток ^{90}Sr по выпуску № 7 в 2021 г. составил 20,5 ГБк/год (1,05 % от ДС).

Радиоактивное загрязнение воды рек Теча и Исеть

Река Теча подверглась радиоактивному загрязнению в период с 1949 по 1956 гг. в результате регламентных и аварийных сбросов жидких радиоактивных отходов (ЖРО) радиохимического производства ФГУП "ПО "Маяк" в период выполнения предприятием государственной оборонной программы.

В настоящее время радиоактивное загрязнение воды р. Течи обусловлено только радионуклидом ^{90}Sr , а ОА других радионуклидов (^{137}Cs , Pu, тритий и др.) значительно меньше УВ. Загрязнение воды реки ^{90}Sr обусловлено двумя источниками:

– поступлением ^{90}Sr со сточными водами по выпуску № 7 (сброс с консольных сбросов ЛБК и ПБК);

– поступлением ("вымыванием") ^{90}Sr из заболоченных пойменных земель (Асановские болота), которые были загрязнены в период с 1949 по 1956 гг.

Створ Муслумово является контрольным створом выпуска № 7. Методикой разработки нормативов ДС [10] установлено максимальное допустимое значение ОА радионуклида ^{90}Sr в р. Тече (створ Муслумово), равное 49 Бк/дм³.

Отбор проб осуществляется в створе ж/д ст. Муслумово. Расположение створа выбрано в соответствии с требованиями Росгидромета к расположению пункта гидрохимических наблюдений [11]. К месту отбора проб имеется свободный доступ. Результаты контроля ФГУП "ПО "Маяк" приведены в табл. 5 в сравнении с результатами Челябинского ЦГМС – филиала ФГБУ "Уральское УГМС" (далее – ЦГМС) [12].

В воде р. Течи в створе ж/д ст. Муслумово ОА ^{90}Sr в течение 2021 г. изменялась в диапазоне значений от 3,6 до 26,0 Бк/дм³. Среднегодовая ОА ^{90}Sr повысилась на 30 % по сравнению с 2020 г.

В 2021 г. среднегодовые значения ОА трития и ^{137}Cs в воде р. Течи (створ ж/д ст. Муслумово) остались практически на уровне 2020 г.

Результаты контроля ОА радионуклидов в р. Тече (створ с. Затеченского) приведены в табл. 6.

ОА ^{90}Sr , ^{137}Cs и трития в воде р. Течи в створе с. Затеченского осталась на уровне 2020 г.

В воде р. Исеть в створах с. Далматово и с. Красноисетского ФГУП "ПО "Маяк" контролирует ОА только ^{90}Sr . Результаты контроля приведены в табл. 7.

В 2021 г. ОА ^{90}Sr в воде в створе с. Красноисетского составила 0,14 Бк/дм³.

Объёмная активность радионуклидов в воде р. Караболки

Контроль загрязнения воды р. Караболки по программе контроля [1] проводился в двух пунктах: в нижнем бьефе болота Бугай раз в год в мае и в створе с. Татарская Караболка 4 раза в

Таблица 5

Объёмная активность радионуклидов воды р. Течи, створ Муслимово, Бк/дм³

| Дата отбора | ОА радионуклидов | | | | | |
|---------------------|------------------|------|--------|-------|-------------------|------|
| | ⁹⁰ Sr | | Тритий | СAA* | ¹³⁷ Cs | |
| | Маяк | ЦГМС | Маяк | ЦГМС | Маяк | ЦГМС |
| Январь | 5,8 | 9,9 | 160 | <0,02 | 1,7 | 0,37 |
| Февраль | 8,2 | 8,8 | 160 | <0,02 | <0,5 | 0,22 |
| Март | 8,7 | 6,4 | 130 | <0,02 | <0,5 | 0,25 |
| Апрель | 8,0 | 2,9 | 55 | <0,02 | <0,5 | 0,14 |
| Май | 3,6 | 4,0 | 70 | <0,02 | <0,5 | 0,10 |
| Июнь | 4,9 | 4,5 | 70 | <0,02 | 1,9 | 0,11 |
| Июль | 5,2 | 9,2 | 75 | <0,02 | 0,9 | 0,15 |
| Август | 8,2 | 8,7 | 80 | <0,02 | <0,5 | 0,11 |
| Сентябрь | 8,4 | 8,2 | <40 | <0,02 | 0,81 | 0,06 |
| Октябрь | 5,7 | 12,2 | <40 | <0,02 | <0,5 | 0,07 |
| Ноябрь | 26 | 14,5 | 150 | 0,03 | <0,5 | 0,16 |
| Декабрь | 10,8 | 11,7 | 180 | 0,02 | <0,5 | 0,17 |
| Среднее за 2021 год | 8,6 | 8,4 | 100 | 0,02 | <0,7 | 0,16 |
| Среднее за 2020 год | 5,5 | 8,3 | 120 | <0,02 | <0,8 | 0,14 |
| Среднее за 2019 год | 6,6 | 7,6 | 130 | 0,11 | <0,5 | 0,31 |

Примечание. * СAA – суммарная активность всех α-излучающих радионуклидов.

Таблица 6

Объёмная активность радионуклидов воды
р. Течи, створ с. Затеченского, Бк/дм³

| Дата отбора | Радионуклид | | |
|-----------------|------------------|----------------|-------------------|
| | ⁹⁰ Sr | ³ T | ¹³⁷ Cs |
| Март | 8,1 | 140 | 0,02 |
| Сентябрь | 1,6 | <40 | <0,3 |
| Средняя за 2021 | 4,9 | <90 | <0,3 |
| Средняя за 2020 | 4,7 | 43 | <1,3 |

год. Результаты измерений ФГУП "ПО "Маяк" приведены в табл. 8 в сравнении с результатами ЦГМС [12].

Данные табл. 8 показывают, что ОА трития во всех пунктах контроля была ниже МДА, ОА ¹³⁷Cs изменялась от 0,4 до 0,92 Бк/дм³. Все полученные значения ОА ⁹⁰Sr в нижнем бьефе болота Бугай и в створе с. Татарская Караболка ниже УВ [6].

Таблица 7

Объёмная активность ⁹⁰Sr в воде
р. Исеть, Бк/дм³

| Пункт контроля | Дата отбора | ОА ⁹⁰ Sr |
|-------------------|---------------------|---------------------|
| с. Далматово | 26.03.2021 | <0,027 |
| | 24.09.2021 | <0,025 |
| | Средняя за 2021 год | <0,026 |
| | Средняя за 2020 год | <0,10 |
| | Средняя за 2019 год | 0,11 |
| с. Красноисетское | 26.03.2021 | 0,061 |
| | 24.09.2021 | 0,22 |
| | Средняя за 2021 год | 0,14 |
| | Средняя за 2020 год | 0,43 |
| | Средняя за 2019 год | 0,20 |

Таблица 8

Объёмная активность радионуклидов воды р. Караболки, Бк/дм³

| Пункт контроля | Дата отбора | Радионуклид | | | | | |
|------------------------------|---------------------|------------------|------|--------|-------|-------------------|-------|
| | | ⁹⁰ Sr | | Тритий | СAA* | ¹³⁷ Cs | |
| | | Маяк | ЦГМС | Маяк | ЦГМС | Маяк | ЦГМС |
| Створ болота Бугай | 2021 | 1,3 | – | <40 | – | <0,4 | – |
| | 2020 | 3,0 | – | <40 | – | 0,92 | – |
| | 2019 | 2,0 | – | <40 | – | <0,4 | – |
| Створ с. Татарская Караболка | 01.2021 | – | 0,73 | – | <0,02 | – | <0,05 |
| | 02.2021 | 0,36 | 0,63 | <40 | <0,02 | <0,5 | <0,05 |
| | 03.2021 | – | 0,54 | – | 0,02 | – | <0,05 |
| | 04.2021 | – | 1,95 | – | <0,02 | – | <0,05 |
| | 05.2021 | 0,26 | 1,25 | <40 | <0,02 | <0,4 | <0,05 |
| | 06.2021 | – | 0,84 | – | <0,02 | – | <0,05 |
| | 07.2021 | – | 1,92 | – | 0,02 | – | <0,05 |
| | 08.2021 | 0,028 | 0,69 | <40 | 0,03 | <0,4 | <0,05 |
| | 09.2021 | – | 0,57 | – | 0,02 | – | <0,05 |
| | 10.2021 | 0,15 | 0,42 | <40 | <0,02 | <0,4 | <0,05 |
| | 11.2021 | – | 0,94 | – | 0,02 | – | <0,05 |
| | 12.2021 | – | 0,66 | – | 0,02 | – | <0,05 |
| | Среднее за 2021 год | 0,20 | 0,93 | <40 | 0,02 | <0,4 | <0,05 |
| | Среднее за 2020 год | 0,85 | 1,21 | <40 | <0,02 | <1,2 | <0,05 |
| | Среднее за 2019 год | 0,34 | – | <40 | – | <0,4 | – |

Примечание. * СAA – суммарная активность всех α-излучающих радионуклидов.

Содержание радионуклидов в воде озёр ВУРСa

Результаты измерения ОА радионуклидов в воде озёр, расположенных на территории ВУРСa (табл. 9) показывают, что только в воде оз. Урускуль содержание ⁹⁰Sr превышает УВ [6].

Анализируя результаты измерений за последние 10 лет, следует отметить:

- в озёрах Алабуга, Кирпичики и Кожакуль значение ОА ⁹⁰Sr было всегда на порядок величины ниже УВ;

- в оз. Бердениш среднегодовая ОА ⁹⁰Sr снизилась почти на порядок величины и в настоящее время значительно ниже УВ [6];

- содержание ⁹⁰Sr в воде оз. Урускуль снизилось в полтора раза, но ОА остаётся на порядок величины больше УВ [6].

Озёра Урускуль и Бердениш в результате

Таблица 9

Объёмная активность радионуклидов воды озёр, расположенных на ВУРС, Бк/дм³

| Название озера | Дата | Радионуклид | |
|----------------|-----------|------------------|-------------------|
| | | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs |
| Кирпичики | Июнь 2021 | <0,10 | <0,6 |
| | Июнь 2020 | <0,10 | <0,5 |
| Алабуга | Июнь 2021 | 0,03 | <0,6 |
| | Июнь 2020 | 0,10 | <0,4 |
| Кожакуль | Июнь 2021 | 0,31 | 0,36 |
| | Июнь 2020 | 0,14 | <0,4 |
| Бердениш | Июнь 2021 | 0,31 | 1,6 |
| | Июнь 2020 | 0,67 | <0,4 |
| Урускуль | Июнь 2021 | 52 | 1,0 |
| | Июнь 2020 | 52 | 3,8 |

аварии 1957 г. на ФГУП "ПО "Маяк" оказались на территории с примерно одинаковым уровнем радиоактивного загрязнения и имели в первые годы близкие значения ОА ^{90}Sr в воде. Однако процесс самоочищения воды этих озёр проходит по-разному. За период регулярного контроля ОА ^{90}Sr снизилась в воде оз. Бердениш со значений, превышающих УВ [6] в два раза, до значений ниже УВ [6]. В воде оз. Урусуль снижение ОА ^{90}Sr происходит значительно медленнее, и по-прежнему превышает на порядок УВ [6]. Такое различие в очищении воды может быть связано с разным гидрохимическим составом воды (прежде всего с концентрацией сухого остатка), который обусловлен химическим составом подстилающих пород. Озеро Бердениш – пресное озеро с концентрацией сухого остатка (минерализацией) менее 1000 мг/дм³, оз. Урусуль – солоноватое озеро с минерализацией более 3000 мг/дм³.

Результаты контроля воды Иртышско-Каслинской системы озёр

ФГУП "ПО "Маяк" никогда не проводило сброс радиоактивных веществ в озёра Иртышско-Каслинской системы, но повышенное (по сравнению с глобальным уровнем) содержание радиоактивных веществ в озёрах зоны наблюдения может быть обусловлено поверхностно-склоновым стоком воды с ранее загрязнённых территорий при аварийных ситуациях. Для этих водоёмов разработаны, согласованы и утверждены специальные КУ [13] радиоактивного загрязнения воды.

Результаты контроля воды за 2021 г., приведённые в табл. 10, показывают, что ОА радионуклидов в воде озёр находится в пределах установленных КУ радиоактивного загрязнения водоёмов [13]. Объёмная активность ^{137}Cs в воде всех озёр Иртышско-Каслинской системы ниже предела обнаружения. Объёмная активность ^{90}Sr в воде ряда озёр ниже предела обнаружения, в остальных озёрах составляет от 1 до 5,5 % от УВ, установленного санитарными правилами [6].

ВЫВОДЫ

1. Приведены результаты контроля радио-

Таблица 10

Объёмная активность радионуклидов в воде озёр, Бк/дм³

| Озеро | ОА радионуклидов | | КУ [13] | |
|----------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | ^{90}Sr | ^{137}Cs | ^{90}Sr | ^{137}Cs |
| Силач | <0,029 | <0,3 | 0,30 | 0,30 |
| Сунгуль | <0,029 | <0,3 | 0,30 | 0,30 |
| Киреты | <0,027 | <0,3 | 0,30 | 0,30 |
| Большие Касли | <0,027 | <0,3 | 0,30 | 0,30 |
| Малые Касли | <0,027 | <0,3 | 0,30 | 0,30 |
| Куташи | <0,029 | <0,3 | 0,30 | 0,30 |
| Иртыш | <0,027 | <0,3 | 0,30 | 0,30 |
| Большая Наного | <0,027 | <0,3 | 0,70 | 0,40 |
| Малая Наного | 0,07 | <0,3 | 0,70 | 0,40 |
| Большая Акуля | 0,020 | <0,3 | 0,70 | 0,40 |
| Акакуль | <0,025 | <0,3 | 0,70 | 0,40 |
| Увильды | <0,025 | <0,3 | – | – |
| Улагач | 0,04 | <0,3 | 3,0 | 0,70 |
| УВ (НРБ-99/2009) [6] | 4,9 | 11 | – | – |

активного загрязнения водных объектов, расположенных на территории промышленной площадки и зоны наблюдения ФГУП "ПО "Маяк", за 2021 г.

2. Показано, что в 2021 г. значения объёмной активности ^{90}Sr , ^{137}Cs и трития в воде всех контролируемых водных объектов оставались на уровне предыдущих лет или имели тенденцию к снижению.

3. Отмечено, что 2021 г. характеризовался как год пониженной водности, когда объём испарения с водной поверхности существенно превышал атмосферные осадки. Объём годового водного стока на консольном сбросе ЛБК составил 9,03 млн м³, а на консольном сбросе ПБК – 5,68 млн м³.

4. Суммарное поступление сточных вод в р. Течу по выпуску № 7 за 2021 г. составило 14,7 млн м³ (7,4 % от утверждённого сброса), а поступление ^{90}Sr – 20,5 ГБк (1 % от установленного норматива допустимого сброса).

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиационный и химический контроль в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения Федерального государственного унитарного предприятия "Производственное объединение "Маяк": программа ПГ-ЦЗЛ-240-2020 ЦЗЛ / ФГУП "ПО "Маяк". – Озёрск, 2017.
2. И.ЦЗЛ.МИ.251-2019 Стронций-90. Методика измерений объёмной активности в пробах воды с применением экстракционного метода подготовки.
3. И.ЦЗЛ.МИ.215-2021 Вещества радиоактивные. Методика измерений суммарной активности бета-излучающих радионуклидов в счетных образцах на радиометре РИБ-МФ-5.
4. И.ЦЗЛ.МИ.399-2020 Цезий-137, кобальт-60, америций-241. Методика измерений активности радионуклидов в объектах окружающей среды и строительных материалах.
5. И.ЦЗЛ.МИ.024-2017 Тритий. Методика измерений объёмной активности радиометрическим методом.
6. Санитарные правила и нормативы. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): СанПиН 2.6.1.2523-09.
7. Об утверждении нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в окружающую среду (водные объекты) и выдаче разрешения: приказ УМТУ Ростехнадзора от 27.07.2018 № 69-П.
8. Разрешение на сброс радиоактивных веществ (радионуклидов) в окружающую среду: разрешение УМТУ Ростехнадзора № УО-С-0022 от 03.12.2018. Срок действия до 31.12.2025.
9. О предоставлении водного объекта (р. Течи) в пользование: решение Министерства промышленности и природных ресурсов Челябинской области № 74-14.01.05.007-Р-РС БХ-С-2018-04204/00 от 26.11.2018. Срок действия до 31.12.2025.
10. Методика разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты для водопользователей: утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22.12.2016 № 551.
11. Паспорт пункта наблюдений за загрязнением поверхностных водных объектов суши № 311009, утв. директором ФГБУ "Гидрохимический институт", 2019.
12. Итоговый аналитический отчет по государственному контракту № 9 от 01 февраля 2021 г. на оказание услуг по организации контроля радиационной обстановки на реках Тече и Караболке (предоставление специализированной информации в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения окружающей среды). – Екатеринбург, 2021.
13. Контрольные уровни (КУ) радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды зоны наблюдения за счёт деятельности ФГУП "ПО "Маяк": отчёт / ЦЗЛ ФГУП "ПО "Маяк". – Озёрск, 2019.

УДК 621.039.553.5
© 2022

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА ТЕРРИТОРИИ ЗОНЫ НАБЛЮДЕНИЯ ФГУП "ПО "МАЯК" В 2021 ГОДУ

*Ю.Г. Мокров, Н.Б. Исаева, Т.А. Яркова
Россия, г. Озёрск, ФГУП "ПО "Маяк"*

Приведены результаты контроля загрязнения атмосферы, почвы и растительности ^{137}Cs , ^{90}Sr и изотопами плутония ($^{239,240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu), полученные в 2021 г. специалистами ФГУП "ПО "Маяк" и Росгидромета в районе расположения предприятия. Отмечено, что объёмная активность (ОА) ^{137}Cs , ^{90}Sr в приземном слое атмосферы зоны наблюдения предприятия на 6–7 порядков, а ОА $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu на 3–5 порядков величины ниже установленных санитарных норм. Ранее было показано, что регистрируемое внутригодовое (среднемесячное) изменение ОА атмосферы обусловлено относительно высоким и крайне неравномерным радиоактивным загрязнением почвы на территории предприятия и большим числом неорганизованных природно-техногенных источников выброса, связанных с дефляцией и ветровым уносом радиоактивной пыли при проведении строительных, сельскохозяйственных и/или реабилитационных работ, а также при пожарах и возгораниях на ранее (аварии 1957 и 1967 гг.) загрязнённых территориях. Показано, что радиационная обстановка в районе предприятия характеризуется стабильностью, а полученные в 2021 г. результаты контроля соответствуют аналогичным результатам измерений предыдущих лет и подтверждают ранее выявленные закономерности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: МОНИТОРИНГ, ОБЪЁМНАЯ АКТИВНОСТЬ, АТМОСФЕРА, АЭРОЗОЛЬ, ВЫПАДЕНИЯ, ^{90}Sr , ^{137}Cs , ПЛУТОНИЙ, ДЕФЛЯЦИЯ, РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВЫ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Федеральное государственное унитарное предприятие "Производственное объединение "Маяк" (ФГУП "ПО "Маяк") расположено на территории закрытого административно-территориального образования – города Озёрска – и является одним из крупнейших предприятий ядерно-топливного цикла. Система радиационного и радиоэкологического контроля и мониторинга (СРКМ) в районе расположения предприятия была создана в 1951 г. [1] и с тех пор постоянно совершенствуется.

Характерной особенностью района ФГУП "ПО "Маяк" следует считать [1–3]:

- относительно высокое и крайне неравномерное радиоактивное загрязнение почвы на территории промышленной площадки (ПП) предприятия;

- радиоактивное загрязнение территории ПП сформировалось в 1950–1960-х годах в результате ряда крупных радиационных аварий и обусловлено в основном радионуклидами це-

зия-137 (^{137}Cs), стронция-90 (^{90}Sr) и в меньшей степени изотопами плутония-239, 240 и 238 ($^{239,240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu), что определяет долговременный характер загрязнения;

- большая площадь территории промышленной площадки (ПП), границы которой совпадают с границами санитарно-защитной зоны (СЗЗ) – 250 км² – и зоны наблюдения (ЗН) – 1800 км²;

- наличием разнообразных неорганизованных природно-техногенных источников загрязнения атмосферы, связанных с дефляцией и ветровым уносом радиоактивной пыли при проведении строительных, сельскохозяйственных и/или реабилитационных работ, а также при пожарах и возгораниях на ранее загрязнённых территориях [1–3] и др.

После внедрения на ФГУП "ПО "Маяк" в 1960-х годах многоступенчатой системы очистки и контроля газо-аэрозольных выбросов основное загрязнение приземного слоя атмос-

феры (ПСА) определялось ветровым уносом водного аэрозоля с акватории водоёма Карачай (водоём В-9, акватория водоёма ликвидирована в 2015 г.) [2], а выбросы из труб предприятия практически не оказывали существенного влияния. Начиная с 2015 г. (после засыпки Карачая) и по настоящее время загрязнение атмосферы радионуклидами в районе расположения предприятия обусловлено в основном вторичным ветровым подъёмом с ранее (1950–1960 гг.) загрязнённых территорий и определяется метеорологическими факторами (направлением и скоростью ветра, наличием растительности, степенью увлажнения почвы и др.) [2].

В зависимости от метеоусловий, внутригодовое (среднемесячное) изменение объёмной активности (ОА) ^{137}Cs , ^{90}Sr и суммы α -излучающих изотопов плутония (ΣPu) в атмосфере может отличаться от среднегодового (чрезвычайно низкого) значения, как правило, не более чем в 2–3 раза [2]. Но в период проведения на ПП масштабных работ по реабилитации ранее загрязнённых территорий среднемесячная ОА атмосферы вблизи ПП может до 10 раз превышать среднегодовое значение.

Целью работы является обобщение и анализ результатов штатного контроля и мониторинга радиоактивного загрязнения атмосферы, почвы и наземной растительности на территории ЗН в 2021 г.

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Действующая на ФГУП "ПО "Маяк" система обеспечения радиационной безопасности населения включает в себя ряд многоуровневых независимых подсистем и не ограничивается только задачами СРКМ окружающей среды.

На первом (исходном) уровне находятся заводские автоматизированные системы управления и контроля технологических процессов (АСУТП). Так, например, АСУТП радиохимического завода осуществляет непрерывный (в режиме реального времени) контроль за состоянием более 5000 различных технологических параметров, влияющих на безопасность, включая системы оперативного контроля выбросов в атмосферу. При получении предупреждающих сигналов об отклонении контролируемых па-

раметров от установленных значений оператор АСУТП должен не только выполнить необходимые корректирующие действия, но и может выдать команду на внеплановое определение значений выбросов с использованием штатных систем контроля ("ручная" замена аналитических фильтров и оперативное измерение активности фильтра в лабораторных условиях).

Другим важным элементом системы радиационной безопасности предприятия является автоматизированная система мониторинга ядерно и радиационно опасных объектов и грузов (АСМЯРОГ). Эта система действует независимо от АСУТП и предназначена для оперативного информирования (в режиме реального времени) не только о любых отклонениях в состоянии ядерно опасных объектов, но и о нарушении эксплуатации вспомогательных систем, включая системы контроля выбросов, вентиляции, энергоснабжения, несанкционированного доступа и др. Одной из составляющих АСМЯРОГ является автоматическая система контроля радиационной обстановки (АСКРО), которая включает более 30 постов контроля мощности дозы, расположенных как на ПП (13 постов), так и в селитебной зоне. При возникновении каких-либо нештатных ситуаций или отклонений в эксплуатации (по показаниям автоматизированных систем контроля АСУТП, АСМЯРОГ-АСКРО и других), которые могут потенциально оказать влияние на загрязнение объектов окружающей среды, выдаётся команда на внеплановую смену фильтрующих материалов системы радиационного контроля (СРКМ) и проведение детального радиационного обследования территории. Таким образом, действующие на предприятии автоматизированные системы позволяют не только оперативно и точно определить время и источник повышенного выброса, мощность выброса, но и его радионуклидный состав.

Мониторинг загрязнения атмосферы на территории Челябинской области осуществляют региональное подразделение Росгидромета – Челябинский ЦГМС – филиал ФГБУ "Уральское УГМС" (ЦГМС) – и ФГУП "ПО "Маяк". В состав сети мониторинга Росгидромета входят три стационарные воздухо-фильтрующие установки (ВФУ), предназначенные для контроля объёмной активности (ОА) радионуклидов в

атмосфере, и 17 планшетов, предназначенных для определения плотности радиоактивных выпадений (ПРВ). ФГУП "ПО "Маяк" осуществляет контроль загрязнения атмосферы с использованием 9 ВФУ, 32 планшетов [7] и 32 "конусов" [6] – индикаторных методов контроля ОА (табл. 1).

Системы мониторинга Росгидромета и СРКМ ФГУП "ПО "Маяк" дополняют и частично дублируют друг друга. Эксплуатация СРКМ осуществляется на основании "Программы радиационного контроля..." [5], которая регулярно (не реже одного раза в 3 года) пересматривается и утверждается в установленном порядке. Помимо рутинных мероприятий, выполняемых по "Программе...", на предприятии периодически выполняются детальные (целевые) радиационные обследования различных ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО) из числа наиболее значимых объектов использования атомной энергии (ОИАЭ).

Каждое такое обследование, как правило, выполняется в рамках отдельной научно-исследовательской работы (НИР), поскольку требует разработки специальных методик и применения специального оборудования. Например, при контроле выбросов из труб α -излучающих трансурановых элементов (ТУЭ) в атмосферу (изотопы плутония, америция, нептуния, кюрия и др.), в лабораторных условиях определяется только активность суммы всех α -излучающих радионуклидов, включая естественные радионуклиды (ЕРН). В штатном режиме такие изме-

рения проводятся раз в сутки. При этом вся накопленная на аналитическом фильтре активность консервативно приписывается активности ^{239}Pu как наиболее радиотоксичного α -излучателя. Такой режим контроля позволяет оперативно и с приемлемой точностью проводить рутинный контроль выбросов ТУЭ без нарушения требований радиационной безопасности. Детальный анализ содержания всех ТУЭ проводится только периодически с использованием сложных, длительных (несколько недель) и трудоёмких радиохимических методик. К числу таких исследований можно также отнести, например, результаты измерений радионуклидного состава загрязнения атмосферы ТУЭ [4].

Регулярный контроль загрязнения атмосферы с использованием ВФУ в районе предприятия ЦГМС проводит начиная с 1996 г. в пунктах контроля (ПК) Новогорный, Аргаяш, Кыштым. Особое место в системе мониторинга занимает ПК Новогорный, поскольку эта территория расположена в непосредственной близости от ФГУП "ПО "Маяк" и поэтому подверглась максимальному загрязнению от всех аварийных и хронических источников выбросов [1–3].

Приоритетной задачей СРКМ ФГУП "ПО "Маяк" является гарантированное обеспечение радиационной безопасности персонала, населения и природной среды на всей прилегающей к предприятию территории с учётом всех возможных источников, факторов и путей воздействия. Поэтому специалисты предприятия в ряде случаев не стремятся определить

Таблица 1

Состав, типы и количество пунктов контроля загрязнения атмосферы, используемые в Челябинском ЦГМС и на ФГУП "ПО "Маяк"

| Метод контроля | Число ПК | | Примечание |
|-------------------------|----------|-----------------|--|
| | ЦГМС | ФГУП "ПО "Маяк" | |
| ВФУ | 3 | 9 | Основной метод контроля ОА радионуклидов в ПСЛ |
| Планшет [7] | 17 | 32 | Основной метод контроля выпадений радионуклидов |
| Конус [6] | – | 32 | Индикаторный метод контроля ОА, территориально совмещены с положением планшетов. |
| АСКРО | – | 31 | Измерения мощности эквивалентной дозы (МЭД), непрерывный режим |
| Передвижные лаборатории | – | 2 | Измерение МЭД по маршруту движения, полевая γ -спектрометрия |

истинное значение фонового загрязнения во всех многочисленных пунктах контроля, а ограничиваются только подтверждением, что измеренные значения многократно (более чем на пять порядков величины) меньше значения допустимой объёмной активности для населения (ДОО_{нас}). Такие задачи, выполняемые в рамках Программы [5], в большей степени соответствуют требованиям не радиационного мониторинга, а радиационного контроля. Для достижения целей радиационной безопасности неважно, на пять или на восемь порядков величины измеренное значение ОА меньше допустимой объёмной активности для населения (ДОО_{нас}) [9].

Определение активности отобранных проб проводится с помощью γ -спектрометров с полупроводниковыми детекторами. Измерения содержания α - и β -излучающих радионуклидов в пробах объектов окружающей среды (ООС) проводятся на автоматических α - и β -радиометрах Tennelec 5S XLB и iMatic, радиометре РИБ-МФ5, β -спектрометре СЕБ-01 и α -спектрометрах СЭА-13П, СЭФ-13П.

Таким образом, проведение рутинных исследований состояния ООС в рамках осуществления СРКМ предназначено для подтверждения соответствия текущей радиационной обстановки установленным требованиям и нормам, а НИР — для подтверждения правомерности использования рутинных методов контроля. В совокупности используемая система СРКМ ФГУП "ПО "Маяк" удовлетворяет требованиям радиационного мониторинга.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

ФГУП "ПО "Маяк" осуществляет контроль загрязнения атмосферы с использованием 9 ВФУ (8 ВФУ находятся на территории ПП, а одна – в г. Озёрске) и 32 планшетов и "конусов" – индикаторных методов контроля ОА, включая 17 планшетов и "конусов" в ЗН.

В связи с большим объёмом контроля на ФГУП "ПО "Маяк" для определения ОА радионуклидов в приземном слое атмосферы (ПСА) широко используется индикаторный метод контроля с помощью марлевых конусов [6] со временем экспозиции не более одного

месяца. Несмотря на то, что этот способ носит оценочный (индикаторный) характер и применяется для выявления случаев превышения установленных контрольных уровней (КУ), его использование позволило организовать обширную сеть контроля загрязнения атмосферы, включая труднодоступные участки местности, не обеспеченные энергоснабжением.

В табл. 2 и 3 приведены результаты индикаторного контроля ОА ПСА в ЗН за 2021 г. методом марлевых конусов [6] и методом ВФУ. Погрешность проводимых измерений составляет от 40 до 60 %.

В табл. 4–8 приведены результаты контроля ОА ПСА в ЗН за 2021 г. методом ВФУ в ПК Новогорный, Аргаяш и Кыштым за 2021 г. (данные ЦГМС [8]).

Анализ данных табл. 2–8 позволяет сделать следующие выводы:

– среднегодовые значения ОА суммы β -излучающих и суммы α -излучающих радионуклидов в ПК Озёрск, Кыштым, Новогорный и Аргаяш оказались практически одинаковыми,

Таблица 2
Среднегодовая ОА радионуклидов в ПСА (методом ВФУ) на территории г. Озёрска (площадка ЦЗЛ) в 2021 г. (данные ФГУП "ПО "Маяк"), Бк/м³

| Месяц | Сумма β -излучающих нуклидов * | ¹³⁷ Cs | Сумма α -излучающих нуклидов * |
|----------|--------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|
| Январь | $4,3 \cdot 10^{-4}$ | $3,7 \cdot 10^{-6}$ | $3,1 \cdot 10^{-5}$ |
| Февраль | $7,0 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-5}$ | $2,1 \cdot 10^{-5}$ |
| Март | $5,4 \cdot 10^{-4}$ | $1,6 \cdot 10^{-5}$ | $1,4 \cdot 10^{-5}$ |
| Апрель | $3,1 \cdot 10^{-4}$ | $1,6 \cdot 10^{-5}$ | $1,8 \cdot 10^{-5}$ |
| Май | $3,7 \cdot 10^{-4}$ | $1,5 \cdot 10^{-5}$ | $1,8 \cdot 10^{-5}$ |
| Июнь | $3,5 \cdot 10^{-5}$ | $1,6 \cdot 10^{-5}$ | $< 2,7 \cdot 10^{-6}$ |
| Июль | $3,4 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-5}$ | $2,5 \cdot 10^{-6}$ |
| Август | $3,5 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-5}$ | $8,4 \cdot 10^{-6}$ |
| Сентябрь | $6,0 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-5}$ | $< 1,9 \cdot 10^{-6}$ |
| Октябрь | $4,7 \cdot 10^{-4}$ | $1,5 \cdot 10^{-5}$ | $3,7 \cdot 10^{-6}$ |
| Ноябрь | $5,0 \cdot 10^{-4}$ | $1,6 \cdot 10^{-5}$ | $3,8 \cdot 10^{-6}$ |
| Декабрь | – | – | – |
| Среднее | $4,2 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-5}$ | $1,1 \cdot 10^{-5}$ |

Примечание. * Включая активность естественных радионуклидов (ЕРН).

Таблица 3

Среднегодовая ОА радионуклидов в ПСА (методом "конуса" [6])
на территории ЗН в 2021 г. (данные ФГУП "ПО "Маяк"), мБк/м³

| Пункт контроля | Направление (румб) и расстояние от центра ПП | Сумма β-излучающих нуклидов | ¹³⁷ Cs |
|---|--|-----------------------------|-------------------|
| г. Озёрск, профилакторий | северо-запад, 12 км | 0,60 | <0,4 |
| г. Озёрск, городская НФС ⁽¹⁾ | северо-запад, 11 км | 0,36 | <0,4 |
| п. Метлино | северо-восток, 15 км | 0,55 | <0,3 |
| "ТРО-ОНИС" | северо-восток, 15 км | 0,43 | <0,3 |
| п. Новогорный | юг, 7 км | 0,65 | <0,3 |
| НФС(1) на ПП-2 | запад-юго-запад, 10 км | 0,26 | <0,3 |
| г. Кыштым | запад, 15 км | 0,40 | <0,3 |
| п. Худайбердинский | юго-восток, 12 км | 0,66 | <0,4 |
| п. Слюдорудник | запад, 27 км | <0,6 | <0,4 |
| п. Красный Партизан | север-северо-восток, 30 км | 0,77 | <0,4 |
| п. Башакуль | восток, 22 км | 0,64 | <0,3 |
| с. Большой Куяш | северо-восток, 24 км | 0,54 | <0,3 |
| с. Татарская Караболка | северо-восток, 36 км | 0,46 | <0,3 |
| г. Касли | север, 22 км | 0,44 | <0,3 |
| с. Аргаяш, метеостанция | юг, 24 км | 0,22 | <0,2 |
| с. Багаряк | северо-восток, 71 км | 0,39 | <0,3 |
| г. В. Уфалей | северо-запад, 56 км | 0,23 | <0,2 |

Примечание. ⁽¹⁾ НФС – насосно-фильтровальная станция.

а именно: $(2-4) \cdot 10^{-4}$ Бк/м³ и $(1-4) \cdot 10^{-5}$ Бк/м³ соответственно;

– среднегодовые значения ОА ¹³⁷Cs в ПК Озёрск, Кыштым, Новогорный и Аргаяш оказались практически одинаковыми, а именно $\sim (0,1-1) \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, что на 6–7 порядков величины ниже значения $ДОА_{нас} = 27$ Бк/м³ [9];

– среднегодовые значения ОА ⁹⁰Sr в ПК Кыштым, Новогорный и Аргаяш оказались практически одинаковыми, а именно $(0,1-1) \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, что на 5–6 порядков величины ниже значения $ДОА_{нас} = 2,7$ Бк/м³ [9];

– среднегодовые значения ОА ²³⁸Pu в ПК Новогорный, Аргаяш и Кыштым равны $11,5 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, $0,83 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³ и $0,44 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, что на 3–5 порядков величины меньше значения $ДОА_{нас} = 2,7 \cdot 10^{-3}$ Бк/м³ [9];

– среднегодовые значения ОА ^{239,240}Pu в ПК Новогорный, Аргаяш и Кыштым равны $9,51 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, $1,24 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³ и $1,06 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, что на 3–4 порядка величины меньше значения

$ДОА_{нас} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ Бк/м³ [9];

– ОА суммы β-излучающих радионуклидов, измеренные на территории г. Озёрска (площадка ЦЗЛ) при отборе проб методом ВФУ, в пределах экспериментальной погрешности совпадают с аналогичными результатами, полученными при отборе проб методом "конуса";

– нижний предел определения ОА ¹³⁷Cs в ПСА при отборе проб воздуха методом ВФУ, по крайней мере, в 15–20 раз меньше, чем при отборе проб методом "конуса";

– в 2021 г., как и в предыдущие годы, для всех радионуклидов максимальные среднегодовые значения ОА были зарегистрированы в ПК Новогорный, который находится на минимальном расстоянии от ПП (около 4 км);

– в ПК Новогорный, Аргаяш, Кыштым вклад ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в среднегодовое значение ОА суммы β-излучающих радионуклидов составил 4,8 и 4,3 %, 0,74 и 0,39 %, 0,46 и 0,36 % соответственно;

Таблица 4

Среднемесячные значения ОА суммы β -излучающих нуклидов в ПСА в ПК Новогорный, Аргаяш и Кыштым за 2021 г. (данные ЦГМС [8])

| Дата отбора проб | Объёмная активность, 10^{-5} , Бк/м ³ | | |
|------------------|--|-----------|-----------|
| | пос. Новогорный | с. Аргаяш | г. Кыштым |
| Январь | 50,7 | 48,2 | 60,9 |
| Февраль | 27,1 | 30,2 | 31,0 |
| Март | 20,4 | 26,3 | 21,7 |
| Апрель | 20,8 | 21,8 | 21,1 |
| Май | 27,0 | 27,8 | 27,4 |
| Июнь | 25,5 | 28,1 | 24,6 |
| Июль | 19,2 | 18,0 | 17,1 |
| Август | 40,5 | 37,3 | 28,1 |
| Сентябрь | 18,4 | 15,9 | 17,9 |
| Октябрь | 16,1 | 17,2 | 17,0 |
| Ноябрь | 16,1 | 17,1 | 14,7 |
| Декабрь | – | – | – |
| Ср. за 2021 г. | 25,6 | 26,2 | 25,6 |
| Ср. за 2020 г. | 13,6 | 23,5 | 28,0 |

Таблица 5

Среднемесячные значения ОА ^{137}Cs в ПСА в ПК Новогорный, Аргаяш и Кыштым за 2021 г. (данные ЦГМС [8])

| Дата отбора проб | Объёмная активность, 10^{-5} , Бк/м ³ | | |
|------------------|--|-----------|-----------|
| | пос. Новогорный | с. Аргаяш | г. Кыштым |
| Январь | 0,103 | 0,042 | 0,050 |
| Февраль | 4,80 | 0,075 | 0,145 |
| Март | 0,639 | 0,102 | 0,123 |
| Апрель | 0,221 | 0,029 | 0,050 |
| Май | 0,407 | 0,293 | 0,077 |
| Июнь | 0,195 | 0,119 | 0,066 |
| Июль | 0,474 | 0,080 | 0,026 |
| Август | 6,21 | 1,21 | 0,470 |
| Сентябрь | 0,258 | 0,081 | 0,181 |
| Октябрь | 0,159 | 0,057 | 0,039 |
| Ноябрь | 0,106 | 0,046 | 0,059 |
| Декабрь | – | – | – |
| Ср. за 2021 г. | 1,23 | 0,194 | 0,117 |
| Ср. за 2020 г. | 0,137 | 0,076 | 0,070 |

Таблица 6

Среднемесячные (среднеквартальные) значения ОА ^{90}Sr в ПСА в ПК Новогорный, Аргаяш и Кыштым за 2021 г. (данные ЦГМС [8])

| Дата отбора проб | Объёмная активность, 10^{-5} , Бк/м ³ | | |
|------------------|--|-----------|-----------|
| | пос. Новогорный | с. Аргаяш | г. Кыштым |
| Январь | 0,123 | 0,067 | 0,020 |
| Февраль | 4,21 | | |
| Март | 0,221 | | |
| Апрель | 0,007 | 0,087 | 0,083 |
| Май | 0,325 | | |
| Июнь | 0,593 | | |
| Июль | 1,19 | 0,207 | 0,222 |
| Август | 4,25 | | |
| Сентябрь | 0,176 | | |
| Октябрь | 0,121 | 0,041 | 0,037 |
| Ноябрь | – | – | – |
| Декабрь | – | – | – |
| Ср. за 2021 г. | 1,12 | 0,101 | 0,091 |
| Ср. за 2020 г. | 0,123 | 0,111 | 0,083 |

Таблица 7

Среднемесячные значения ОА суммы α -излучающих нуклидов в ПСА в ПК Новогорный, Аргаяш и Кыштым за 2021 г. (данные ЦГМС [8])

| Дата отбора проб | Объёмная активность, 10^{-5} , Бк/м ³ | | |
|------------------|--|-----------|-----------|
| | пос. Новогорный | с. Аргаяш | г. Кыштым |
| Январь | 6,71 | 6,58 | 6,03 |
| Февраль | 3,28 | 3,31 | 2,77 |
| Март | 2,73 | 4,63 | 5,25 |
| Апрель | 3,15 | 1,42 | 3,20 |
| Май | 1,58 | 0,45 | 3,20 |
| Июнь | 1,49 | 2,83 | 3,44 |
| Июль | 3,01 | 1,98 | 3,07 |
| Август | 1,69 | 2,75 | 4,33 |
| Сентябрь | 1,68 | 2,69 | 3,17 |
| Октябрь | 1,51 | 1,67 | 4,97 |
| Ноябрь | 2,26 | 0,34 | 2,32 |
| Декабрь | – | – | – |
| Ср. за 2021 г. | 2,64 | 2,60 | 3,80 |
| Ср. за 2020 г. | 1,53 | 2,36 | 3,94 |

Таблица 8

Среднемесячные (среднеквартальные) значения ОА ^{238}Pu и $^{239,240}\text{Pu}$ в ПСА в ПК Новогорный, Аргаяш и Кыштым за 2021 г. (данные ЦГМС [8])

| Дата отбора проб | Объёмная активность, 10^{-7} , Бк/м ³ | | | | | |
|--------------------|--|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| | пос. Новогорный | | с. Аргаяш | | г. Кыштым | |
| | ^{238}Pu | $^{239,240}\text{Pu}$ | ^{238}Pu | $^{239,240}\text{Pu}$ | ^{238}Pu | $^{239,240}\text{Pu}$ |
| Январь | 2,47 | 0,80 | 0,539 | 0,747 | 0,745 | 1,12 |
| Февраль | 12,1 | 6,36 | | | | |
| Март | 47,7 | 24,9 | | | | |
| Апрель | 0,69 | 2,15 | 1,85 | 1,29 | 0,734 | 1,63 |
| Май | 4,85 | 3,26 | | | | |
| Июнь | 5,98 | 4,60 | | | | |
| Июль | 5,22 | 12,3 | 0,590 | 1,12 | 0,272 | 1,36 |
| Август | 29,8 | 18,7 | | | | |
| Сентябрь | 2,54 | 7,04 | | | | |
| Октябрь | 3,45 | 15,0 | 0,326 | 1,79 | НПО* | 0,117 |
| Ноябрь | – | – | – | – | – | – |
| Декабрь | – | – | – | – | – | – |
| Среднее за 2021 г. | 11,5 | 9,51 | 0,826 | 1,24 | 0,438 | 1,06 |
| Среднее за 2020 г. | 2,85 | 2,78 | 0,335 | 0,60 | 0,418 | 0,84 |

Примечание. * НПО – нижний предел определения.

– в ПК Новогорный, Аргаяш, Кыштым вклад ^{238}Pu и $^{239,240}\text{Pu}$ в среднегодовое значение ОА суммы α -излучающих радионуклидов составил 4,4 и 3,6 %, 0,32 и 0,48 %, 0,12 и 0,28 % соответственно.

В отдельные месяцы 2021 г. в ряде ПК были зарегистрированы повышенные (до 10 раз) уровни ОА ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu и $^{239,240}\text{Pu}$. Ранее [1] было показано, что такая ситуация была обусловлена проведением на предприятии широкомасштабных работ по реабилитации загрязнённых в 1957 г. территорий ПП и по выводу из эксплуатации объектов ядерного наследия, сопровождавшихся повышенным пылеобразованием.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЙ

Результаты определения плотности радиоактивных выпадений (ПРВ) на территории ЗН ФГУП "ПО "Маяк" за 2021 г. приведены в табл. 9.

Анализ многолетних данных о ПРВ в районе предприятия показывает:

– основным источником загрязнения атмосферы является ветровой подъём с ранее (1950–1960-е годы) загрязнённых территорий;

– ветровой подъём и плотность атмосферных выпадений определяется главным образом природными факторами (ветровая нагрузка, степень увлажнения почвы, наличие растительности и др.).

Выше было показано, что, например, для ПК Новогорный вклад ^{137}Cs и ^{90}Sr в среднегодовое значение ОА суммы β -излучающих радионуклидов составляет 4,8 и 4,3 % соответственно. Поэтому значение плотности выпадения ^{137}Cs и ^{90}Sr в ПК Новогорный в 2021 г. можно оценить на уровне 5,8 и 5,2 Бк/м² соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Мониторинг загрязнения почвы включает в себя:

Таблица 9

Плотность радиоактивных выпадений из ПСА [7] на территории ЗН (данные ФГУП "ПО "Маяк") за 2021 г., Бк/м²

| Пункт контроля | Сумма β -излучающих нуклидов | ¹³⁷ Cs |
|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| г. Озёрск, профилакторий | 120 | <200 |
| г. Озёрск, городская НФС ¹ | 350 | <200 |
| п. Новогорный | 120 | <200 |
| "ТРО-ОНИС" | 180 | <200 |
| п. Метлино | <110 | <200 |
| оз. Кожаккуль | <280 | <200 |
| г. Кыштым | <370 | <200 |
| п. Худайбердинский | 180 | <200 |
| п. Слюдорудник | 190 | <200 |
| п. Красный Партизан | 110 | <200 |
| п. Башакуль | 190 | <160 |
| с. Большой Куяш | 210 | <190 |
| с. Татарская Караболка | <60 | <110 |
| г. Касли | 270 | <150 |
| с. Аргаяш, метеостанция | <120 | <300 |
| с. Багаряк | <170 | <150 |
| г. В. Уфалей | <140 | <290 |

Примечание. ¹ НФС – насосно-фильтровальная станция.

– лабораторное определение содержания радионуклидов в пробах почвы;

– периодические измерения с использованием переносных радиометров мощности амбиентной эквивалентной дозы (МАЭД) γ -излучения и плотности потока β -частиц (ППБЧ) с поверхности почвы и дорог.

В июле 2021 г. на территории ЗН ФГУП "ПО "Маяк" были отобраны пробы растительности и почвы. Отбор и подготовку к анализу проб почвы выполняли в соответствии с требованиями (ОСТ 95 10160–85 Охрана природы. Земли. Методы отбора проб). Почва и травянистая растительность отбирались с одного участка площадью 1 м² в местах расположения проботборных устройств "конус" и "планшет". Почва отбиралась методом конверта на глубину пять сантиметров, травянистая растительность срезалась на полную высоту от поверхности

почвы. В табл. 10 приведены результаты измерений поверхностной плотности загрязнения почвы и удельная активность (УА) радионуклидов в растительности (для сухой массы, высушенной при температуре 100 °С).

Полученные значения плотности загрязнения почвы (табл. 10) соответствуют результатам измерений прошлых лет и не противоречат данным работы [10].

РАДИАЦИОННЫЙ ФОН НА МЕСТНОСТИ

Для измерения МАЭД и ППБЧ использовались переносные дозиметрические приборы: ДКГ-02У, ДКС-96, МКС-А02-2М. В 2021 г. среднегодовые значения МАЭД на территории ЗН находились в пределах 0,10–0,17 мкЗв/ч, ППБЧ находилась в пределах 3–6 част./см²·мин) и не отличалась от данных за предыдущие годы. Полученные данные соответствовали естественному фону для Уральского региона.

ВЫВОДЫ

Радиационная обстановка на территории ЗН ФГУП "ПО "Маяк" стабильна. Значения контролируемых параметров радиационной обстановки в ЗН предприятия ниже регламентированных нормативными документами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мокров К.Ю., Мокров Ю.Г. Анализ результатов мониторинга загрязнения атмосферы стронцием-90 и цезием-137 в районе ФГУП "ПО "Маяк" за 2000–2019 годы // Вопросы радиац. безопасности. – 2021. – № 1. – С. 37–50.
2. Мокров К.Ю., Мокров Ю.Г. Реконструкция плотности выпадений стронция-90 и цезия-137 в районе расположения ФГУП "ПО "Маяк" за период 1950–2020 годы (на примере пос. Новогорный) // Вопросы радиац. безопасности. – 2021. – № 2. – С. 35–45.
3. Мокров К.Ю., Мокров Ю.Г. Анализ атмосферных выпадений цезия-137 в зоне наблюдения ФГУП "ПО "Маяк" на примере посёлка Новогорный // Вопросы радиац. безопасности. – 2015. – № 2. – С. 16–27.
4. Мокров Ю.Г., Мокров К.Ю. Идентификация источников загрязнения атмосферы трансурани-

Таблица 10

Поверхностная плотность загрязнения почвы и УА радионуклидов в растительности на территории ЗН (данные ФГУП "ПО "Маяк") в 2021 г.

| Пункт контроля | Почва, кБк/м ² | | | Растительность, Бк/кг | | |
|------------------------|---------------------------|------|------------------|-----------------------|-----|------------------|
| | ¹³⁷ Cs | ΣPu | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs | ΣPu | ⁹⁰ Sr |
| г. Касли | <0,5 | 0,72 | 1,55 | <20 | <3 | 19 |
| г. Кыштым | 1,2 | 0,37 | 0,75 | <20 | <3 | 11 |
| г. Озёрск, НФС | 1,2 | 0,60 | 0,55 | <20 | <3 | 73 |
| д. Сарыкульмяк | 8,0 | 0,65 | 7,50 | <20 | <4 | 34 |
| с. Аргаяш | 1,3 | 0,55 | 0,55 | <20 | <3 | <7 |
| п. Башакуль | 4,7 | 0,45 | 5,50 | <20 | <3 | 61 |
| п. Калиновский | 5,6 | 0,65 | 2,25 | <20 | <3 | 22 |
| п. Красный Партизан | <0,5 | 0,45 | 2,45 | <20 | 3,0 | <7 |
| п. Метлино | 2,1 | 0,21 | 2,40 | <20 | <3 | 59 |
| "ТРО-ОНИС" | 0,8 | 0,28 | 1,60 | <20 | <3 | 71 |
| п. Новогорный | 5,2 | 0,65 | 1,10 | <20 | <3 | 64 |
| п. Худайбердинский | 1,8 | 0,37 | 0,60 | <20 | <3 | 13 |
| с. Большой Куяш | 1,5 | 0,40 | 2,05 | <20 | <3 | 12 |
| с. Кузнецкое | 0,8 | 0,29 | 0,65 | <20 | <3 | 11 |
| с. Татарская Караболка | 1,0 | 0,40 | 0,75 | <20 | <3 | 21 |
| г. В. Уфалей | <0,5 | 3,45 | 4,50 | <20 | <3 | 7,5 |
| с. Багаряк | 0,7 | 0,24 | 3,05 | <20 | <3 | 11 |
| с. Муслимово | <0,5 | 1,00 | <0,55 | <20 | <4 | 7,3 |
| п. Слюдорудник | 0,5 | 0,75 | 0,37 | <20 | <3 | <7 |

новыми радионуклидами в районе ФГУП "ПО "Маяк" весной 1988 года // Вопросы радиац. безопасности. – 2018. – № 2. – С. 66–78.

5. Радиационный и химический контроль в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения Федерального унитарного предприятия "Производственного объединения "Маяк": программа Пг-ЦЗЛ-240-2020 / ФГУП "ПО "Маяк"; исп. Фирсов Н.В., Антонова Т.А., Исаева Н.Б. – Озёрск, 2020.

6. ОСТ 95 10123–85. Общие требования к отбору проб радиоактивных аэрозолей из приземного слоя атмосферы. Охрана природы. Атмосфера, 1985.

7. ОСТ 10166–86. Седиментационный метод отбора проб радиоактивных выпадений. Охрана природы. Атмосфера, 1986.

8. Интернет ресурс: <http://mob.gov74.ru/htmlpages/Show/RB/Rezultatykontrolyaradiacionnoj/Tekushhayaradiacionnayaobstano>

9. СанПиН 2.6.1.2523–09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы.

10. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года / Под ред. Ю.А. Израэля. – М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, Фонд "Инфосфера" – НИИ-Природа, 2013. – 140 с.

УДК 539.12.04

© 2022

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЛОЩАДКИ ФГУП "ПО "МАЯК" В 2021 ГОДУ

Г.А. Постовалова

Россия, г. Озёрск, ФГУП "ПО "Маяк"

Описана система мониторинга состояния подземных вод в районе влияния ФГУП "ПО "Маяк", и обобщены результаты наблюдений, полученных в 2021 г. при проведении штатного контроля. На основе выполненных картографических построений определены масштабы и динамика развития ореолов загрязняющих компонентов в подземных водах района. Установлено, что крупные техногенные загрязнения, образованные в пределах водоёмов В-9 и В-17, в 2021 г. находились в стабильном состоянии, так как сдерживанию развития ореолов способствовали факторы: истощение источников загрязнения, а следовательно, сокращение валового поступления загрязняющих веществ в водоносный горизонт; противодействие встречных потоков, препятствующих распространению ореолов в южном направлении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ, ^{90}Sr , СУЛЬФАТ-ИОН, НИТРАТЫ, ВОДОЁМ КАРАЧАЙ, ТЕЧЕНСКИЙ КАСКАД ВОДОЁМОВ

ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ МОНИТОРИНГА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Мониторинг состояния подземных вод, развитых в районе влияния ФГУП "ПО "Маяк", выполняется через сеть гидрогеологических скважин, формирование которой проходило на протяжении десятилетий (более 70 лет). Современная сеть мониторинга охватывает территорию общей площадью более 300 км². Закономерность размещения наблюдательных скважин обусловлена географическим положением источников радиоактивного загрязнения, степенью их воздействия на гидрохимическое состояние подземных вод и экологической значимостью контролируемых объектов (их близостью от зоны наблюдения, населённых пунктов, водозаборов питьевого назначения и т.д.). Схема размещения режимных скважин приведена на рис. 1.

Гидрогеологические наблюдения выполняются силами двух предприятий: ФГУП "ПО "Маяк" и ФГБУ "Гидроспецгеология".

Наблюдения взаимно дополняют друг друга и создают целостное представление о состоянии подземной гидросферы и динамике развития техногенных загрязнений в подземных водах района влияния ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО) ФГУП "ПО "Маяк". Общее количество наблюдательных скважин, посредством которых осуществляется объектный мониторинг состояния недр (ОМСН), на сегодняшний день составляет 497 шт. Из них ФГУП "ПО "Маяк" ведёт контроль в 210 скважинах, созданных преимущественно в пределах размещения ЯРОО. Сеть мониторинга предприятия позволяет прослеживать геохимическую ситуацию вокруг наиболее крупных источников загрязнения (специальных промышленных водоёмов В-9 и В-17), а также вблизи локальных источников — пунктов хранения радиоактивных отходов (ПХ РАО) и остановленных промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР). Гидрогеологические наблюдения осуществляются в соответствии с принятой и утверждённой руководством предприятия программой мониторинга [1].

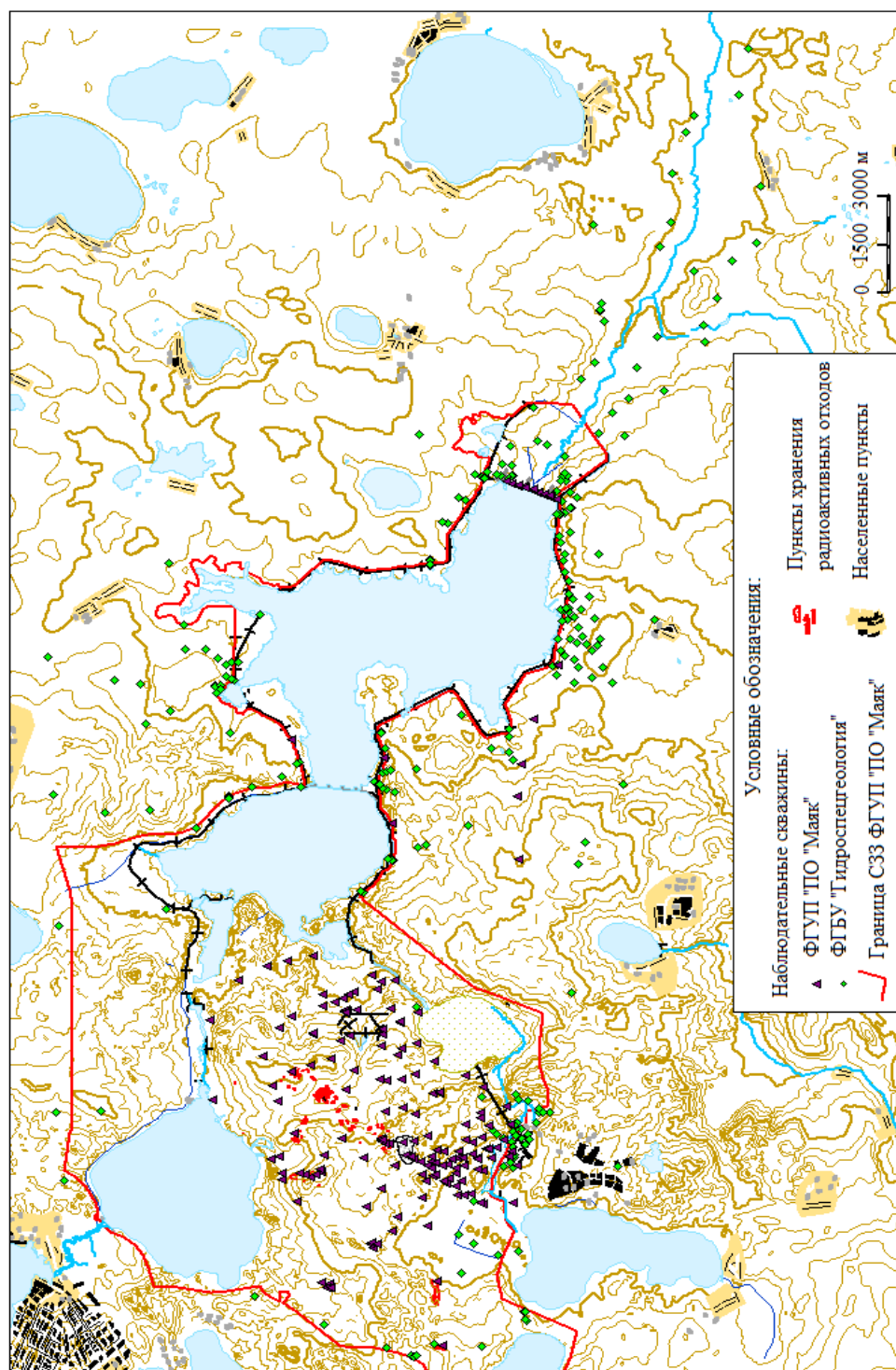


Рис. 1. Расположение сети наблюдательных скважин в районе ФГУП "ПО "Маяк"

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Методическое руководство по ведению ОМСН осуществляет Центр мониторинга ФГУБ "Гидроспецгеология".

Основными целями ОМСН являются:

- регулярное наблюдение за гидродинамическим и гидрогеохимическим режимами подземных вод и получение достоверных результатов контроля;

- выявление техногенного воздействия на состояние подземных вод со стороны как промышленных, так и хозяйственных объектов;

- обработка и анализ результатов наблюдений, а также оценка качества подземных вод и их соответствия действующим нормативам;

- определение основных параметров техногенных загрязнений на основе построения электронных карт;

- систематизация результатов наблюдений (ведение базы данных) и информационное обеспечение запросов о состоянии подземных вод.

Во всех скважинах ФГУП "ПО "Маяк" ежемесячно выполняют измерения уровня подземных вод, а в 118 из них отбирают пробы подземных вод с периодичностью один раз в год для проведения лабораторных анализов по контролируемым показателям:

- объёмные активности (ОА) ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , трития;

- ОА суммы α -излучающих радионуклидов только в пробах подземных вод, отобранных в пределах влияния ПХ РАО;

- массовые концентрации (МК) нитрат-, сульфат-ионов, урана, минерализация и градус жёсткости.

По результатам мониторинга выполняют построение специализированных карт, что позволяет отслеживать сезонные изменения структуры грунтового потока и динамику развития техногенных загрязнений. В качестве критериев оценки площади распространения техногенных загрязнений в подземных водах используют значения норм радиационной безопасности и гигиенические нормативы [2–3]. Данные нормативные показатели выбраны на основании общей экологической ситуации,

существующей в пределах рассматриваемой территории, а именно:

- близости нахождения района развития загрязнённых подземных вод к зоне наблюдения;

- присутствия группы водозаборов питьевого назначения пос. Новогорный, эксплуатирующих силур-девонский водоносный горизонт, в котором потенциально возможно распространение радионуклидов.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА В РАЙОНЕ ВЛИЯНИЯ ЯДЕРНО И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

В подземных водах района ПП, границы которой совпадают с границами санитарно-защитной зоны (СЗЗ), выделяются различные техногенные аномалии, отличающиеся масштабами и интенсивностью техногенного загрязнения. По основным геохимическим признакам, источникам загрязнения и участкам локализации можно выделить три группы аномалий.

Первая группа – это крупные техногенные аномалии, образованные вокруг специальных промышленных водоёмов В-9 (Карачаевский ореол) и В-17. Ореолы характеризуются многокомпонентным химическим и радионуклидным составом, значительным загрязнением подземных вод по площади и глубине (до 70–100 м), а также зональным строением. Зональное строение ореолов связано с изменением химического и геохимического составов подземных вод по глубине и простиранию. Для всех ореолов характерно увеличение МК и ОА загрязняющих веществ с глубиной и уменьшение МК и ОА компонентов от источников загрязнения (В-9 и В-17) к периферии ореолов. Строение наиболее крупных ореолов (по нитрат-иону и ^{90}Sr) показано на рис. 2 и 3.

Вытянутые в субмеридиональном направлении формы ореолов, а также закономерности распределения загрязняющих веществ в водоносном горизонте обусловлены основными факторами:

- особенностями тектонического и складчатого строения района;

- гидрогеологическими условиями района;

Условные обозначения

Скважины, в которых производится отбор проб подземных вод
в соответствии с программами мониторинга :

162,0(100)



ФГУП "ПО"Маяк

> 3 000(89)



ФГБУ "Гидроспецгеология"

Цифры рядом со скважиной - массовая концентрация нитрат-иона (мг/дм^3) в подземных водах по данным мониторинга за февраль - март 2021 года; в скобках указана глубина опробования водоносного горизонта (м)



Остановленные промышленные уран-графитовые реакторы



Линии "метро"

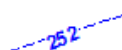


Пункты хранения радиоактивных отходов

Гидроизогипсы подземных вод и их абсолютные отметки (м) на февраль 2021 года:



достоверные



предполагаемые

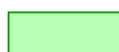


Направление потока подземных вод

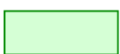
Массовая концентрация нитрат-иона в интервалах максимального загрязнения подземных вод:



ниже 45 (ПДК)



от 45 до 3 000



от 45 до 450



более 3 000

Рис. 2. Карта распространения нитратного загрязнения в подземных водах района влияния водоёмов В-9 и В-1

— фильтрационными, сорбционными, ионообменными свойствами вмещающих пород;

— физико-химическими свойствами техногенных компонентов и их формами нахождения в подземной миграции;

— изменением во времени схем водопользования водоёмов-хранилищ жидких радиоактивных отходов (ЖРО), а также валовыми объёмами сбросов и их радиохимическими составами.

Загрязняющие компоненты представлены в виде анионогенных, катионогенных и комплексных соединений, что определяет их различную подвижность в условиях подземной миграции, а именно:

— химическую устойчивость в водной среде;

— способность к преодолению геохимических барьеров.

Вторая группа аномалий сформирована в пределах ПП предприятия вокруг пунктов ПХ РАО, остановленных ПУГРов, линий промышленных коммуникаций и имеет локальное развитие. По степени воздействия на подземную гидросферу данные загрязнения менее значимы и на фоне контрастного Карачаевского ореола проявлены весьма слабо.

Третья группа аномалий выделяется в районе Теченского каскада водоёмов на участках фильтрационных потоков, направленных из водоёма В-11 в водоносный горизонт по тектонически ослабленным и проницаемым зонам. Аномалии характеризуются сульфатно-стронциевым составом и незначительным площадным распространением.

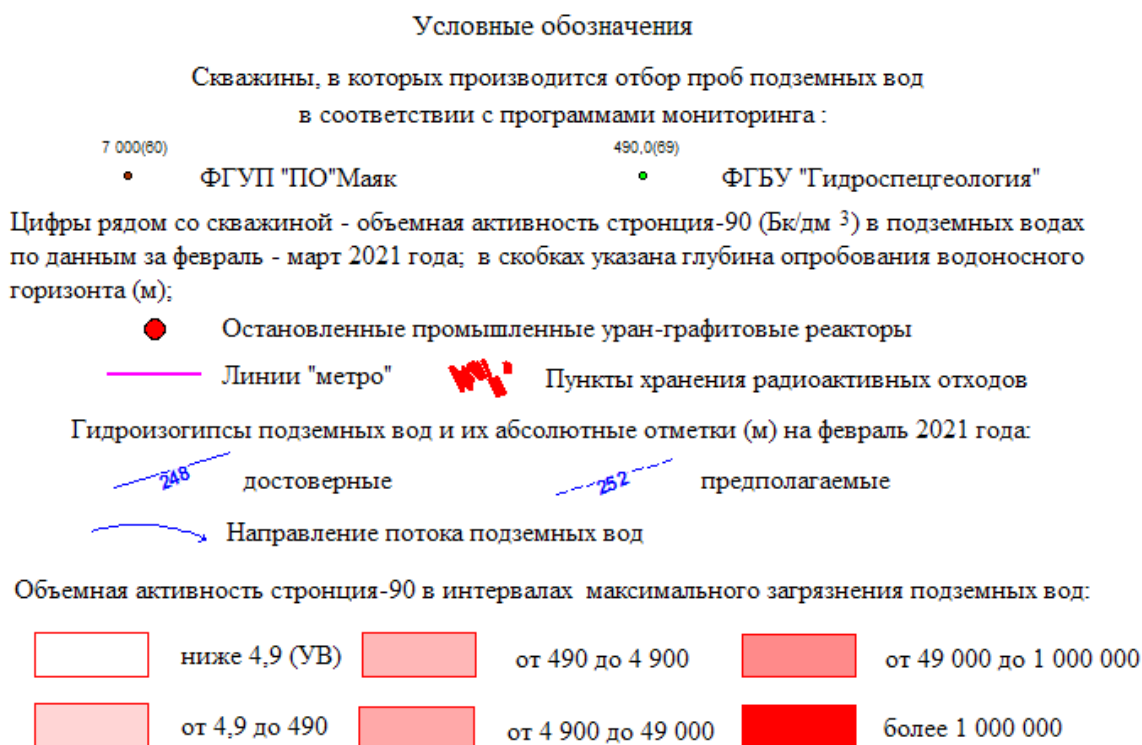


Рис. 3. Карта распространения загрязнения по ⁹⁰Sr в подземных водах района влияния водоёмов В-9 и В-17 и объектов ЯРОО

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОЁМОВ В-9 И В-17

Основные параметры техногенных ореолов, образованных вокруг водоёмов В-9 и В-17, по данным мониторинга за 2021 г., приведены в табл. 1.

Как следует из приведённых данных, ореолы контролируемых техногенных компонентов по размерам площадного распространения распределяются в следующей последовательности (по убыванию):

- по Карачаевскому загрязнению: нитрат-ион → ⁹⁰Sr → уран → ⁶⁰Со → тритий → ¹³⁷Cs;
- по загрязнению вокруг В-17: нитрат-ион → тритий → ⁹⁰Sr.

Учитывая, что нитратные ореолы вокруг водоёмов В-9 и В-17 являются наиболее крупными по площади, их параметры могут рассма-

триваться в качестве количественной оценки общего техногенного загрязнения подземных вод от данных источников.

Карачаевский ореол характеризуется высокой интенсивностью радионуклидного загрязнения подземных вод. В центральной его части выделяется область подземных вод, которую по объёмной активности ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs можно отнести в соответствии с критериями [4] к категории низкоактивных отходов (НАО). По данным на 2021 г., площадь распространения радиоактивно загрязнённых вод категории НАО в границах значений ОА по ⁹⁰Sr ($4,9 \cdot 10^2$ Бк/дм³) составляла 9,8 км².

По результатам наблюдений за 2021 г., в районе влияния водоёма В-9 можно выделить общие особенности динамики изменения техногенных ореолов:

- сокращение площадей техногенных ореолов происходило, преимущественно за счёт

Таблица 1

Основные параметры техногенных ореолов, сформированных в районе влияния водоёмов В-9 и В-17 (по данным мониторинга за 2021 г.)

| Контролируемый показатель | Источник загрязнения подземных вод | Интенсивность загрязнения подземных вод* | Площадь ореола, км ² | Изменение площади ореола в сравнении с 2020 г., % | Расстояние от источника до границ ореола, км | |
|---------------------------|------------------------------------|--|---------------------------------|---|--|-------|
| | | | | | Направление | |
| | | | | | северное | южное |
| Нитрат-ион | В-9 | ** | 19,2 | -0,3 | 3,2 | 3,5 |
| | В-17 | 23,8 ПДК | 4,7 | -0,4 | 2,7 | 0,2 |
| ⁹⁰ Sr | В-9 | 6,1·10 ⁵ УВ | 14,5 | -0,5 | 2,8 | 3,2 |
| | В-17 | 1,1·10 ¹ УВ | 1,1 | -5,2 | 1,0 | 0,2 |
| Тритий | В-9 | 2,0·10 ¹ УВ | 7,1 | 1,7 | 3,2 | 2,6 |
| | В-17 | 6,1·10 ¹ УВ | 2,9 | 0,0 | 2,3 | 0,2 |
| Уран | В-9 | 1,9·10 ³ ПДК | 12,2 | -2,7 | 2,4 | 3,3 |
| ⁶⁰ Co | В-9 | 1,7·10 ¹ УВ | 7,3 | -14,6 | 2,2 | 3,1 |
| ¹³⁷ Cs | В-9 | 2,3·10 ⁴ УВ | 4,2 | -15,0 | 2,2 | 2,6 |

Примечание: * Отношение максимальных ОА и МК загрязняющих веществ в подземных водах, наблюдаемых в скважинах, к значениям уровней вмешательства (УВ) [2] и предельно допустимых концентраций (ПДК) [3]. ** Параметр не определён: максимальный предел обнаружения по методике ФР.1.31.2008.01724 указывается — "более 3000" мг/дм³.

перемещения западных и восточных границ от периферии к центру;

– незначительная отрицательная динамика изменений параметров ореолов по нитрат-иону и ⁹⁰Sr свидетельствует о стабильном состоянии ореолов;

– существенная отрицательная динамика изменений параметров ореолов по ¹³⁷Cs (до -15,0 %) и ⁶⁰Co (до -14,6 %) может свидетельствовать о процессах деградации ореолов;

– распространение Карачаевского загрязнения в южном (наиболее критичном) направлении замедлилось (по ⁹⁰Sr и тритию), а в ряде случаев прекратилось (по урану, ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs);

– сдерживание развития Карачаевского ореола в южном направлении происходит за счёт двух основных факторов:

1) истощения источника загрязнения (В-9) по таким компонентам как нитрат-ион, U, ⁶⁰Co, тритий и, следовательно, сокращение их валового поступления в водоносный горизонт;

2) противодействия встречного потока, разгружающегося в долину р. Мишеляк со стороны местного водораздела (у пос. Новогорный).

Следует отметить, что на южном фланге Карачаевского ореола, вдоль левого борта Мишелякского пруда происходит фильтрация загрязнённых подземных вод в поверхностные воды в результате:

– высачивания фильтрата в краевых бортах долины;

– излива слабонапорных вод через систему наблюдательных скважин и последующего стока по поверхности земли в реку;

– разгрузки ореольных вод через "фильтрационные окна", роль которых выполняют хорошо проницаемые линзы песков и супесей аллювиальных отложений [5].

Многолетний мониторинг поверхностных вод, контролируемых в реперных точках Р-1, Р-4, Р-7 и Р-10 на Мишелякском участке, показал, что, начиная с 2010 г., влияние техногенного Карачаевского загрязнения на состояние речных вод значительно снизилось (рис. 4).

Улучшению радиационного состояния поверхностных вод на участке разгрузки способствовали факторы: замедление развития Карачаевского ореола на его южной периферии и прекращение излива из скважин

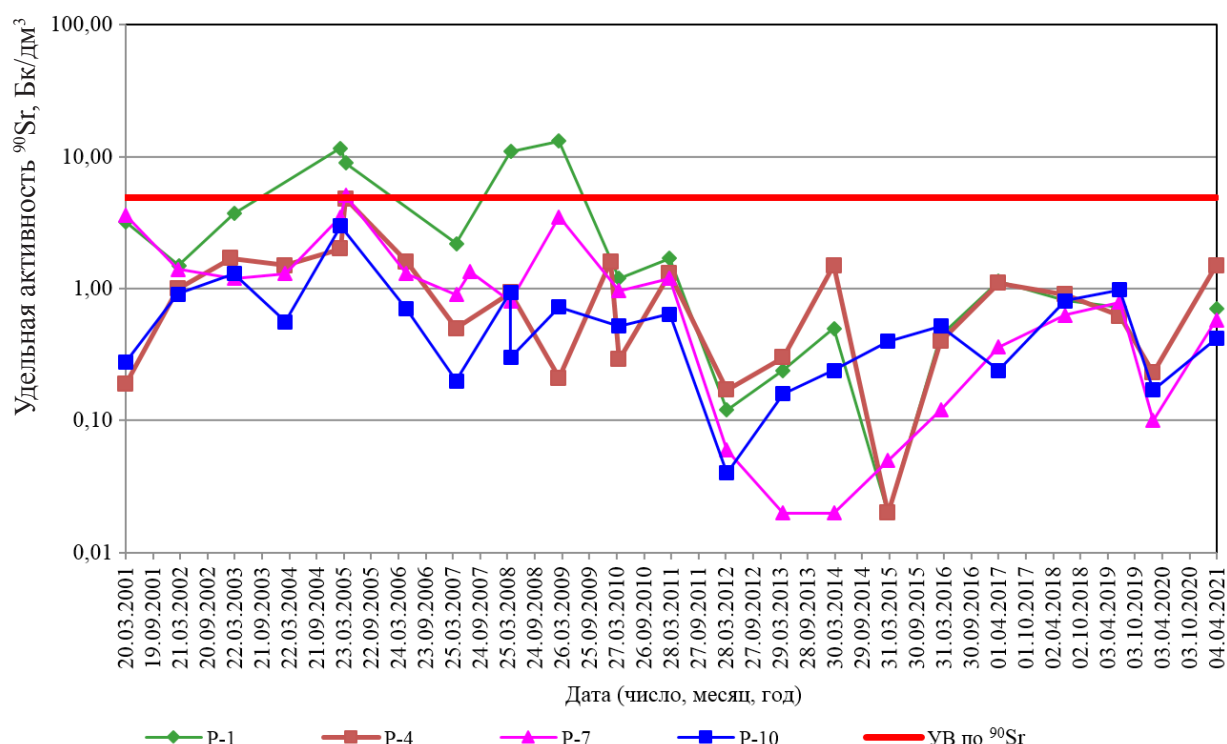


Рис. 4. Многолетняя динамика изменений объёмной активности ^{90}Sr в поверхностных водах р. Мишеляк на участке разгрузки Карачаевских ореольных вод (по данным мониторинга с 2001 по 2021 гг.)

в годы умеренной и низкой водности за счёт снижения уровней подземных вод. Кроме того, на вывод ^{90}Sr из дальнейшей водной миграции положительное влияние оказывают процессы самоочищения реки, обусловленные влиянием сорбционных глинистых барьеров.

В 2021 г. границы существующих вокруг водоёма В-17 ореолов по нитрат-иону, ^{90}Sr и тритию не претерпели значительных изменений. Площади ореолов по сравнению с прошлым годом или сохранили свои параметры (по тритию), или уменьшились (по нитрат-иону и ^{90}Sr), что свидетельствует о стабильном состоянии ореолов на данном участке.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНЕ ТКВ

В настоящее время по результатам гидро-

геологических наблюдений выделяются две локальные зоны, где происходит поступление фильтрационных потоков из водоёма В-11 в водоносный горизонт с формированием техногенных аномалий в районе:

- нижнего бьефа плотины П-11;
- участков "Водораздел" и "Куст-85", расположенных на южном побережье водоёма.

Аномалии характеризуются сульфатно-стронциевым составом загрязняющих веществ. МК сульфат-иона на участке влияния В-11 не превышает значений ПДК и контролируется в качестве маркера техногенного загрязнения для оценки перспективного развития стронциевого загрязнения. За внешнюю границу сульфатной аномалии принимается изолиния в значении 50 мг/дм^3 , что составляет $0,1 \text{ ПДК}$. Внешней границей стронциевого загрязнения принимается изолиния в значении УВ ($4,9 \text{ Бк/дм}^3$).

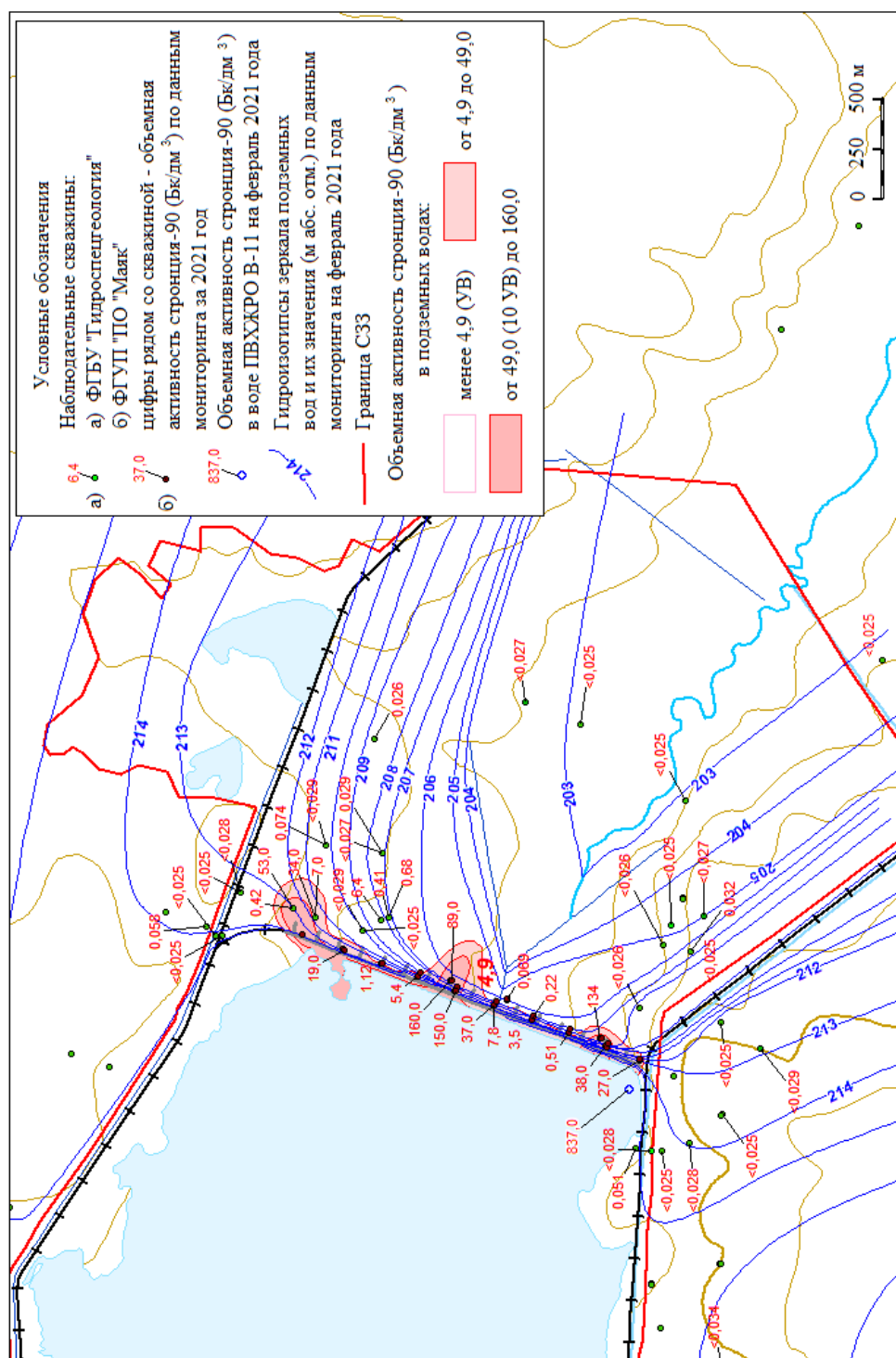


Рис. 5а. Схема распространения техногенного загрязнения подземных вод ⁹⁰Sr на участке размещения плотины П-11 (по данным мониторинга за 2021 г.)

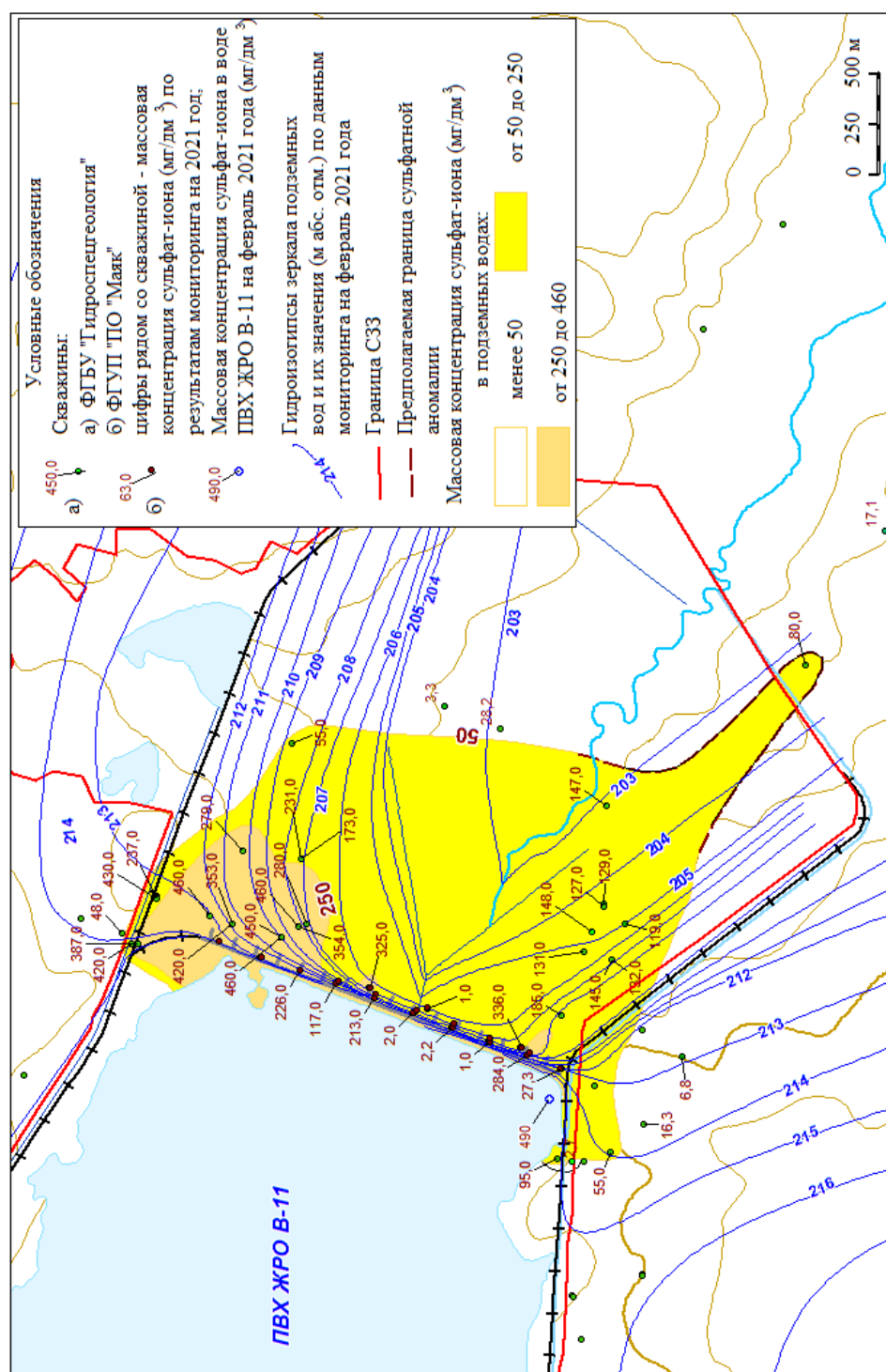


Рис. 5б. Схема распространения техногенного загрязнения подземных вод сульфат-ионом на участке размещения плотины П-11 (по данным мониторинга за 2021 г.)

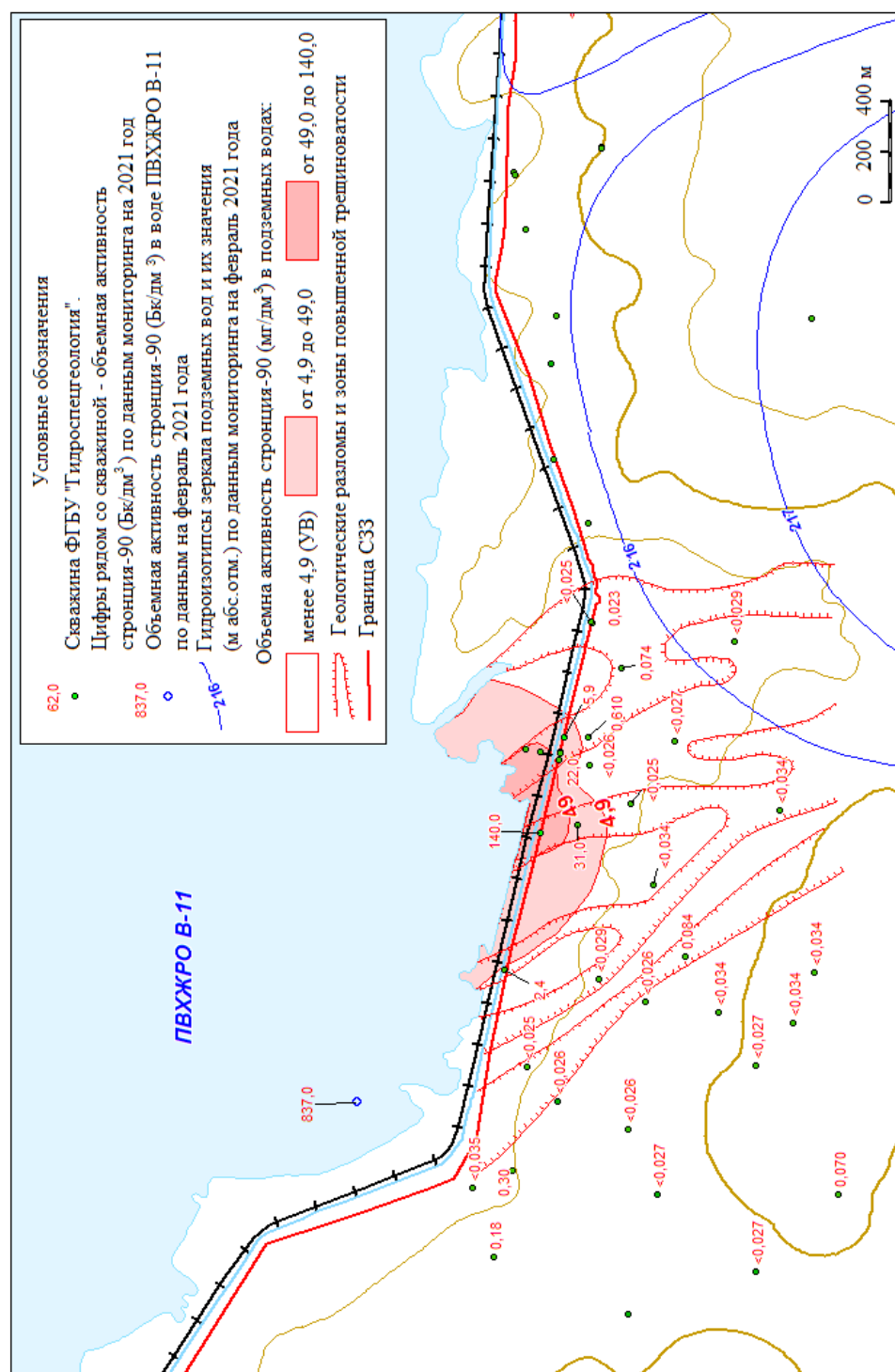


Рис. 6а. Схема распространения техногенного загрязнения подземных вод ^{90}Sr на участках "Водораздел" и "Куст-85", расположенных к югу от водоёма В-11 (по данным мониторинга за 2021 г.)

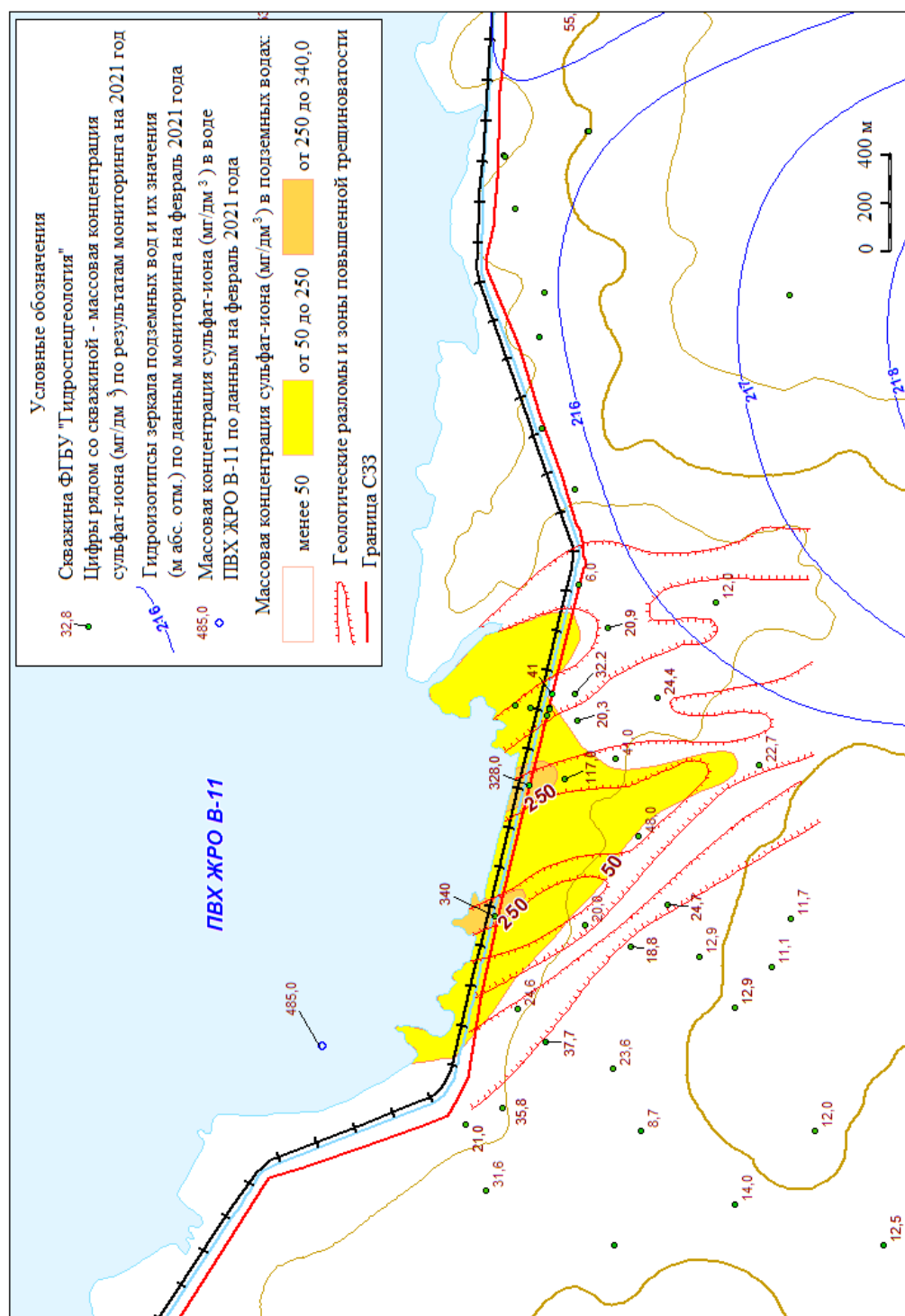


Рис. 6б. Схема распространения техногенного загрязнения подземных вод сульфат-ионом на участках "Водораздел" и "Куст-85", расположенных к югу от водоёма В-11 (по данным мониторинга за 2021 г.)

Таблица 2

Параметры и динамика изменений стронциевых аномалий, развитых в подземных водах района влияния водоёма В-11 (по данным мониторинга за 2021 г.)

| Участок наблюдения | Период наблюдений | Интенсивность загрязнения* | Площадь аномалии, км ² | Максимальная протяжённость по потоку, км | Максимальная ширина потока, км |
|--------------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------------|
| Плотина П-11 | 2020 | 39 УВ | 0,24 | 0,32 | 1,9 |
| | 2021 | 33 УВ | 0,28 | 0,35 | 2,0 |
| Южный берег водоёма В-11 | 2020 | 18 УВ | 0,40 | 0,33 | 1,3 |
| | 2021 | 28 УВ | 0,38 | 0,31 | 1,2 |

Примечание. * Отношение ОА компонента к значению УВ.

Распространение загрязняющих веществ от водоёма В-11 происходит в виде отдельных потоков, направленных по тектонически-ослабленным, хорошо проницаемым зонам. В районе плотины П-11 максимальная активность ⁹⁰Sr отмечается на участках плечевых примыканий плотины и в центральной части нижнего бьефа плотины, где создаётся максимальный гидравлический напор загрязнённых вод. Схемы распространения техногенных загрязнений в пределах влияния водоёма В-11 показаны на рис. 5 и 6.

Динамика изменения основных параметров стронциевых аномалий, сформированных в пределах влияния В-11 по данным за 2021 г., в сравнении с прошлым годом приведена в табл. 2.

Стронциевые аномалии на рассматриваемых участках характеризуются небольшими линейными размерами. В плане они имеют неправильную, вытянутую вдоль побережья и сильно изрезанную форму. Площади стронциевых ореолов в границах значений УВ за 2021 г. составили:

- в районе плотины П-11 – 0,28 км² (увеличилась на 15 %);
- на участках "Водораздел" и "Куст-85" – 0,38 км² (уменьшилась на 5 %).

Следует отметить, что максимальные объёмные активности ⁹⁰Sr, наблюдаемые в подземных водах выявленных аномалий, более чем в пять раз меньше аналогичного показателя в самом источнике загрязнения, в водоёме В-11. Такое соотношение активностей может свидетельствовать о потенциале развития стронци-

евых ореолов в водоносном горизонте, как по площади распространения, так и по интенсивности загрязнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На предприятии сложилась, поддерживается и развивается система объектного мониторинга состояния недр.

2. Гидрогеологические и гидрохимические наблюдения за состоянием подземных вод проводятся в систематическом и непрерывном режиме.

3. Наблюдения и специальные исследования по мониторингу состояния подземных вод ведутся при методическом руководстве Центра мониторинга ОМСН ФГБУ "Гидроспецгеология".

4. Результаты мониторинга состояния подземных вод за последние годы (в том числе за 2021 г.) свидетельствуют о замедлении процессов распространения компонентов в ореолах, сформированных вокруг водоёмов В-9 и В-17, а также о возможной деградации ряда ореолов (⁶⁰Co и ¹³⁷Cs).

ЛИТЕРАТУРА

1. Программа ведения объектного мониторинга за состоянием недр на ФГУП "ПО "Маяк" на 2019–2021 годы (гидрогеологические и гидрохимические наблюдения): Пг-ЦЗЛ-608-2019 / ФГУП "ПО "Маяк". – Озёрск, 2019.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): СанПиН 2.6.1.2523–09. – М., 2009.

3. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: СанПиН 2.1.3685–21. – М., 2021.
4. Критерии отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам: критерии; утв. постановлением Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069. – М., 2012.
5. Формирование радиоактивного состава поверхностных вод в верховье реки Мишеляк: Отчёт / ФГУП "ПО "Маяк"; рук. Иванов И.А.; исполн.: Постовалова Г.А. – Озёрск, 2005.

УДК 621.039.553.5+502.55

© 2022

РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТКВ, ПРОВОДИМОГО ФГБУ "ГИДРОСПЕЦГЕОЛОГИЯ" В 2021 ГОДУ

И.В. Цивилёв, О.В. Горлов

*Россия, г. Москва, Партия 10 Филиала "Гидрогеологическая
экспедиция № 30" ФГБУ "Гидроспецгеология"*

Теченский каскад водоёмов (ТКВ) – объект использования атомной энергии, хранилище жидких радиоактивных отходов (ЖРО), сложная природно-техногенная гидротехническая система, состоящая из четырёх поверхностных водоёмов, расположенных в долине р. Течи, системы плотин, обводных каналов и различных гидротехнических сооружений (ГТС). Для разработки и реализации научно-практических мероприятий по долговременной безопасной эксплуатации ТКВ необходимо осуществлять комплексный гидрологический, гидрогеологический и радиационный мониторинг всех объектов ТКВ. Приведены результаты гидрологических и гидрохимических наблюдений на поверхностных водотоках в районе ТКВ и на водных объектах, расположенных в пределах зоны наблюдения ФГУП "ПО "Маяк", выполненных ФГБУ "Гидроспецгеология" в 2021 г. Рассмотрены цели, задачи, объём и периодичность выполняемых наблюдений, а также основные результаты, выявленные тенденции и тренды. Показано, что данные мониторинга позволяют оценить эффективность эксплуатации подпорных гидротехнических сооружений на правом берегу и левобережном каналах, предназначенных для снижения фильтрационного поступления загрязняющих веществ из ТКВ в р. Течу. Показано, что результаты мониторинга являются надёжной основой для проведения математического моделирования состояния поверхностных и подземных вод и для обоснованного прогноза долговременной безопасной эксплуатации ТКВ в качестве пункта размещения особых радиоактивных отходов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ, ТЕЧЕНСКИЙ КАСКАД ВОДОЁМОВ, ГИДРОГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, ШЛЮЗ-РЕГУЛЯТОР, ЖИДКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ, ^{90}Sr , СУЛЬФАТ-ИОН, БЕЗОПАСНОСТЬ

Теченский каскад водоёмов (ТКВ) расположен на территории ФГУП "ПО "Маяк" в верховье р. Течи и является пунктом размещения жидких радиоактивных отходов (ЖРО), накопленных в воде более чем за 60-летнюю историю его эксплуатации. Основная часть накопленной в ТКВ активности (более 90 %) поступила в воды р. Течи со сбросами ЖРО в 1950-е годы, в период пуска и освоения радиохимического производства ФГУП "ПО "Маяк", при выполнении предприятием государственного оборонного заказа по производству ядерного оружия. ТКВ представляет собой сложный, изолированный от открытой гидрографической системы гидрогеологический природно-техногенный объект – хранилище

низкоактивных ЖРО. ТКВ расположен ниже оз. Кызыл-Таш (водоём В-2) и состоит из четырёх водоёмов (В-3, В-4, В-10 и В-11), разделённых плотинами, системы левобережного (ЛБК) и правобережного (ПБК) обводных каналов и ряда гидротехнических сооружений (ГТС). Для снижения фильтрационного поступления радионуклидов из водоёмов ТКВ в р. Течу на ПБК сооружены два шлюза-регулятора (ШР) уровня воды в канале, а на ЛБК находится целый ряд подпорных ГТС:

- головное подпорное сооружение в районе плотины П-2 предназначено для снижения фильтрационного поступления загрязнённой воды из водоёма В-2 в ЛБК;
- порог-регулятор в районе плотины П-10

предназначен для снижения фильтрационного поступления загрязнённой воды из водоёма В-10 в ЛБК;

- три лога, из которых первый и второй расположены между створами плотины П-10 и плотины П-11, третий расположен ниже створа плотины П-11;

- шлюз-регулятор (ШР) расположен на 1,5 км выше створа плотины П-11 и предназначен для снижения фильтрационного поступления загрязнённой воды из водоёма В-11 в ЛБК.

Для обеспечения длительной безопасной эксплуатации ТКВ в районе его расположения проводится гидрологический и гидрогеологический мониторинг.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Гидрологический мониторинг в зоне влияния техногенных объектов ФГУП "ПО "Маяк" выполняется с целью изучения пространственно-временных закономерностей изменения гидрологического режима и процесса миграции загрязнённых поверхностных вод. Сеть наблюдений включает 28 водопостов (в/п) и 15 гидростворов (г/с), расположенных на левобережном (ЛБК) и правобережном (ПБК) каналах ТКВ, реках Тече и Мишеляк, озёрах Улагач, Хагальгим, Арголевском карьере, золоотвале Аргашской ТЭЦ (рис. 1).

Основными задачами режимных гидрологических наблюдений являются:

- определение гидрометрических показателей, характеризующих режим водного стока ПБК, ЛБК и рек Мишеляк и Течи, и их изменений во времени;

- определение внутригодового стока ^{90}Sr в открытую гидрографическую сеть;

- изучение природных и техногенных факторов, влияющих на распространение компонентов-загрязнителей;

- оценка эффективности работы шлюзов-регуляторов (ШР) на ЛБК и ПБК;

- получение гидрологических данных по водоёмам, расположенным в контролируемой зоне ФГУП "ПО "Маяк", с целью насыщения информационной базы математической модели региона.

Полевые и камеральные работы выполне-

ны партией № 10 Филиала "Гидрогеологическая экспедиция № 30" ФГБУ "Гидроспецгеология". Химические и радиохимические анализы выполнены ЦЗЛ ФГУП "ПО "Маяк".

СОСТАВ И МЕТОДИКА РАБОТ

Комплекс гидрологических работ в пределах контролируемой зоны ФГУП "ПО "Маяк" в 2021 г. включал:

- ежедневные наблюдения на 28 водомерных постах ЛБК, ПБК, р. Мишеляк, р. Течи, золоотвала АТЭЦ, оз. Хагальгим, оз. Улагач, Арголевского карьера;

- ежедекадные измерения расходов воды на 11 гидростворах ПБК, ЛБК, рек Мишеляк и Течи;

- ежемесячные измерения расходов воды в зоне подпора шлюзов-регуляторов на ПБК (ШР-1-ПБК и ШР-2-ПБК), ЛБК (ШР-1-ЛБК) и в нижнем бьефе плотины П-12, включая гидрохимическое опробование поверхностных вод по 18 точкам.

При выполнении замеров использовались средства измерений (СИ) установленных образцов, применяемые при гидрологических исследованиях. Поверка СИ проводилась в лаборатории ФГБУ "Уральское УГМС".

Отбор проб воды по каналам и рекам выполнялся ежемесячно по 18 точкам. Для возможности сопоставления результатов опробований текущего года и предыдущих лет точки отбора проб постоянны и "привязаны" к водомерным постам и гидротехническим сооружениям.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДОТОКОВ И ВОДОЁМОВ

В 2021 г. гидрологический режим водотоков в пределах контролируемой зоны ФГУП "ПО "Маяк" формировался в условиях дефицита водных ресурсов. Сумма атмосферных осадков в 2021 г. составила 325,2 мм при норме 442,8 мм (по данным метеостанции ФГУП "ПО "Маяк"). При обеспеченности года по сумме атмосферных осадков в 88,3 % и повторяемости, равной 8,6 года, 2021 год характеризуется как средний маловодный год.

На режим уровней каналов основное влияние оказывал метеорологический фактор,

Рис. 1. Схема расположения пунктов гидрологических наблюдений в районе ТКВ

а вблизи гидротехнических сооружений (ГТС) – режим эксплуатации ШР на ЛБК и ПБК. Среднегодовые расходы воды в 2021 г. на всех гидростворах ТКВ были значительно ниже среднеемноголетних значений. Сброс воды из озёр Иртышско-Каслинской системы (ИКС) не проводился. Поэтому годовой водный сток по ЛБК и р. Тече в 2021 г. был незначительным.

Начало половодья было приурочено к первой декаде апреля, когда наблюдался уверенный переход через "ноль" среднесуточных температур воздуха, что характерно для местных условий и подтверждается многолетними наблюдениями. Мизерное количество осадков в апреле и мае обусловило быстрое снижение уровней и расходов каналов до минимальных значений, а необычно высокая температура воздуха в мае способствовала быстрому зарастанию ПБК и подъёму уровней на весь летний период, в то время как на ЛБК, вне зоны влияния ГТС, ход уровней был весьма спокоен до конца года.

Левобережный канал (ЛБК)

Гидрологический режим ЛБК определялся как метеорологическими условиями (количеством атмосферных осадков), так и режимом эксплуатации ГТС (ШР). В 2021 г. среднегодовые значения водного стока на основных гидростворах ЛБК были в 1,4–1,7 раза меньше, чем в 2020 г. С начала года водный режим ЛБК формировался в условиях ледостава и зимней межени, т.е. при минимальном стоке воды по каналу и отсутствии притока с площади водосбора. Поэтому перепады уровней, наблюдаемые на водопостах, были отражением режима эксплуатации ГТС или проявлением русловых ледовых явлений. Амплитуды изменения уровня в этот период достигали 0,7 м.

Расход воды по ЛБК в период ледостава изменялся от 0,12 до 0,48 м³/с. Начало весеннего половодья на ЛБК было отмечено ростом уровней на 0,2–0,5 м, а чуть раньше – их падением в верхней части канала (в/п-9, в/п-10) на 0,13–0,17 м, что было связано с вскрытием канала ото льда и снятием подпора. В зоне подпора ШР-1-ЛБК (в/п-13, в/п-35), где уровень полностью регулируется ШР, половодье вызвало рост уровней на 0,4 м (до отметки 216,3 м).

Расход воды по ЛБК в период весеннего половодья для разных створов варьировал в пределах от 0,4 до 1,17 м³/с.

С началом летней межени равномерный ход уровней канала нарушался лишь работой ГТС на участке от лога-2 до ШР-1-ЛБК, где чередование сбросов воды через сооружение и прикрытие затворов на минимальный сброс вызывали колебания уровней в зоне подпора с амплитудой до 0,7 м. Расход воды по каналу за этот период составил от 0,02 до 0,39 м³/с.

Осенне-зимний период второй половины года (до декабря) отмечен стабильным ходом уровней с амплитудой 0,05–0,20 м по всем водопостам, включая те, что расположены в зоне подпора ШР-1-ЛБК (в/п-42, 22, 9–13, 35). Ниже ШР-1-ЛБК в этот период амплитуда уровней составила 0,2–0,4 м. В декабре, с началом ледостава, зафиксирован рост уровней на водопостах 11, 12 и 15 от 0,1 м до 0,35 м. Расход канала за этот период составил от 0,02 до 0,42 м³/с.

Следует особо отметить, что большую часть года, за исключением половодья, наблюдались потери поверхностного стока на участке от г/с-14 до ШР-1-ЛБК, что связано как с фильтрацией воды через дамбу канала в В-11, так и с увеличением инфильтрации в подземные воды за счёт повышения уровня и увеличения площади зеркала поверхностных вод в зоне подпора.

Правобережный канал (ПБК)

Гидрологический режим ПБК в течение 2021 г. был обусловлен природными (метеорологическими) и техногенными факторами. В верхней и средней частях канала основную роль в формировании водного режима играли природные факторы. В нижней части канала, где эксплуатируется ШР-2-ПБК, гидрологический режим канала был полностью подчинён режиму работы этого ГТС (рис. 2). Среднегодовой расход воды по каналу в замыкающем гидростворе был равен 0,173 м³/с, что составило 70 % от среднеемноголетнего значения. В верхней части канала (в/п-19, 1–4) уровенный режим ПБК в начале года и в период ледостава имел относительно стабильный характер с амплитудой 0,10–0,35 м. В нижней части канала, где определяющим фактором гидрологического режима являются условия эксплуатации ШР-2-ПБК, в

этот период маневрирование затворами было минимальным, поэтому отмечены незначительные колебания уровня воды с амплитудой до 0,25 м. Расход в ПБК варьировал в пределах: г/с-7 – 0,05–0,16 м³/с, г/с-12 – 0,05–0,15 м³/с, г/с-8 – 0,10–0,20 м³/с.

Половодье на ПБК началось с первых чисел апреля, а пик половодья пришёлся на середину первой декады. Характерно, что в 2021 г. отмечено два пика половодья: первый приурочен к сходу снежного покрова, второй — к оттаиванию деятельного слоя. Расход ПБК, зафиксированный на пике половодья, составил: г/с-7 – 0,36 м³/с, г/с-12 – 0,41 м³/с, г/с-8 – 0,43 м³/с.

Режим ПБК в послепаводковый период характеризовался небольшими изменениями уровней по всему каналу (до 0,15 м). Однако в мае в связи с необычно быстрым повышением среднесуточной температуры воздуха произошло резкое зарастание русла, что вызвало, в свою очередь, подъём уровня в канале на 0,5 м. С началом июня количество выпавших осадков возросло, что повлекло дальнейший рост уровней в канале, а также увеличение расхода канала в основной его части, который достиг 0,44 м³/с. Следует отметить, что в этот период зафиксированы максимальные потери стока канала на участке г/с-12–г/с-8, составившие в мае и июне 0,14–0,09 м³/с. Расход ПБК в этот период варьировал в пределах: г/с-7 – 0,22–0,44 м³/с, г/с-12 – 0,24–0,43 м³/с, г/с-8 – 0,23–0,31 м³/с. Выпавшие в июле осадки обеспечили среднемесячный сток канала на уровне 0,20–0,22 м³/с. Минимальное количество осадков в августе обусловило снижение расхода воды по каналу к концу месяца до значений 0,09 м³/с и выход на осеннюю межень с расходом 0,08–0,09 м³/с.

В конце ноября службой эксплуатации ГТС по техническим причинам были открыты на срок около двух недель затворы на ШР-2-ПБК, что привело к сбросу воды, накопленной в верхнем бьефе. При этом произошло резкое снижение уровня и одновременное кратковременное резкое значительное (до 1,53 м³/с) увеличение расхода воды на замыкающем гидростворе г/с-8 (рис. 2). В результате произошло взмучивание, подъём и смыл активных илов из ложа канала, что зафиксировано гидрохимическим опробованием и подтверждено результа-

тами измерений отобранных проб воды [1].

Река Теча

Гидрологический режим р. Течи в замыкающем гидростворе ТКВ (г/с-9) формируется за счёт стока по ЛБК и ПБК, а также притоком вод, фильтрующихся через основание плотины П-11 (рис. 1). Годовой водный сток в 2021 г. составил всего 13,9 млн м³ (~60 % от стока в 2020 г.).

В начале года в продолжение зимней межени до начала апреля расход р. Течи был весьма незначителен и варьировал в пределах 0,20–0,4 м³/с (рис. 2). Уровненный режим формировался в условиях ледового подпора. Амплитуда изменения уровня в этот период составила ~0,30 м. Половодье, начавшееся в первой декаде апреля, отмечено сначала увеличением расхода воды до 0,8–1,0 м³/с, а затем вскрытием реки, резким падением уровня на 0,5 м и расходом на пике половодья до 1,45 м³/с. Последующее снижение расхода реки до 1,1 м³/с перешло в паводок, вызванный небольшими осадками, с расходом до 1,49 м³/с. В течение второй половины мая и до начала августа шло равномерное снижение расхода реки с 1,41 до 0,17 м³/с с последующим выходом на осеннюю межень с расходом до 0,06 м³/с. Первые признаки ледостава наблюдались в начале ноября с ростом уровня на 0,15 м. В конце года отмечен пиковый скачок расхода в результате техногенного сброса воды на ШР-2-ПБК. Расход реки в этот момент составил 1,40 м³/с. Постепенное снижение расхода привело к его стабилизации в первой декаде декабря в пределах 0,30 м³/с.

В 2021 г. объём стока р. Течи на 90 % состоял из суммарного стока каналов. Среднегодовой прирост расхода на участке от плотины П-11 до г/с-9 на р. Тече составил 0,03 м³/с. Учитывая маловодность года, можно предположить, что этот прирост расхода р. Течи полностью обусловлен фильтрацией загрязнённых вод под телом П-11.

Река Мишеляк

Режим р. Мишеляк на участке предполагаемой разгрузки подземных вод ореола распространения загрязнения от ПХ РАО В-9 регулировался водопропускным сооружением дамбы в районе в/п-18. Подпор, создаваемый в

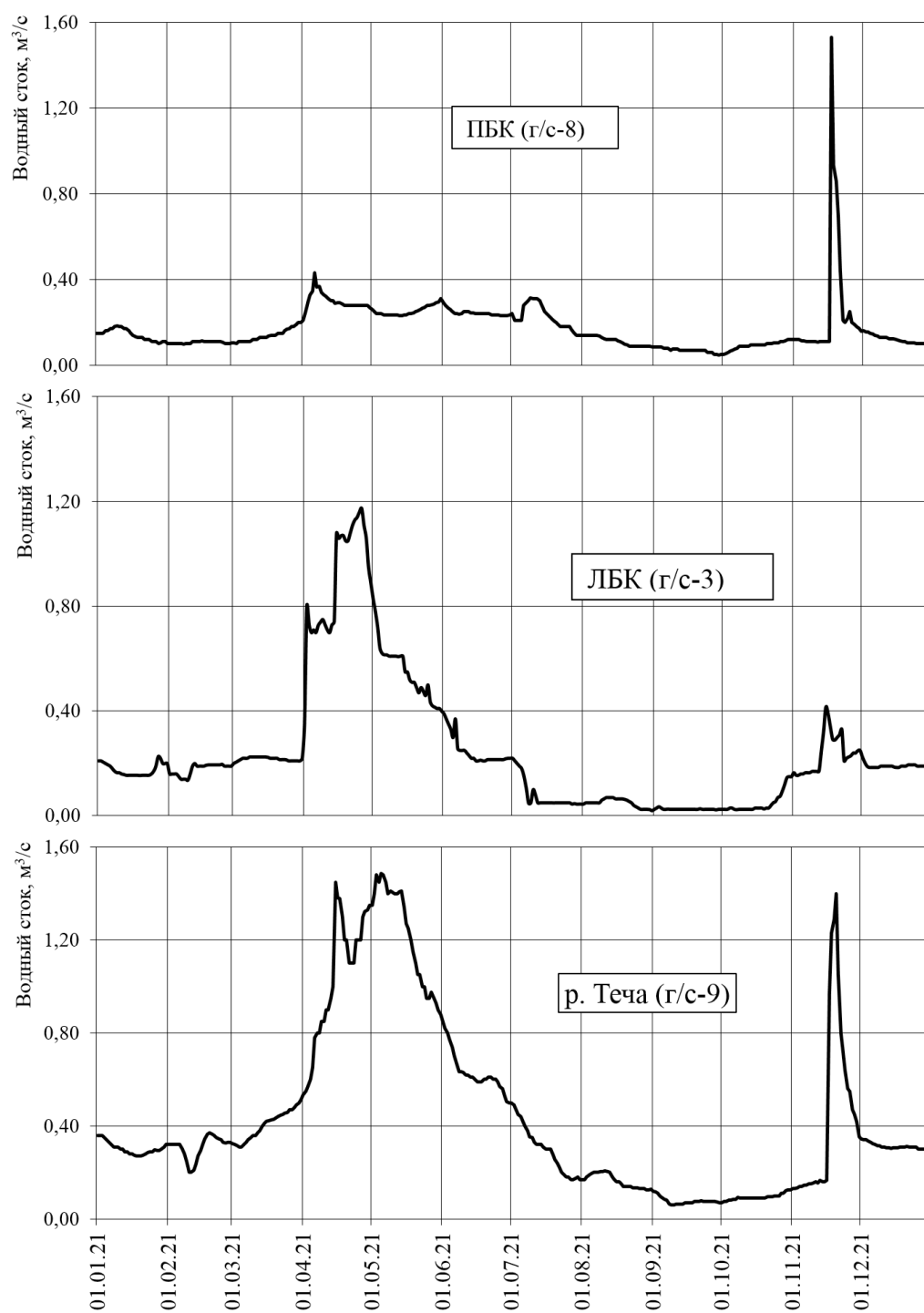


Рис. 2. Совмещённые гидрографы ПБК (г/с-8), ЛБК (г/с-3) и р. Течи (г/с-9)

верхнем бьефе дамбы, поднял уровень пруда и практически скрыл русло реки в районе г/с-21. В нижнем бьефе дамбы минимальное количество воды, проходящее через водопропускное сооружение, разливается в пойме реки, не образуя русла и делая проблематичным измерение расхода на г/с-20. В связи с минимальным количеством атмосферных осадков и отсутствием переброски воды из водосборной канавы водоема В-6 (оз. Татыш) водный сток на гидростворах г/с-20, 21 р. Мишеляк в 2021 г. практически отсутствовал.

Наблюдения за уровнем реки на водопостах в/п-18, 20, 21 показали, что изменение уровней происходит синхронно и с минимальной амплитудой. В течение зимней межени изменения уровней на всех водопостах составляли 0,05–0,07 м. С наступлением половодья наблюдался синхронный рост уровней на 0,04–0,17 м. Расход реки за счёт создаваемого подпора оставался "нулевым" как в верхнем (г/с-21), так и в нижнем (г/с-20) гидростворах. С окончанием половодья уровни на в/п-18, 21 оставались на тех же отметках в течение мая за счёт выпавших осадков, после чего наблюдалось плавное их снижение на 0,25–0,35 м вплоть до наступления осенне-зимней межени. На в/п-20 наблюдалась та же картина, но с меньшей амплитудой (0,15 м) и с подъёмом уровней в летний период за счёт зарастания русла. Водный сток реки на контролируемом участке за счёт подпора и зарастания русла практически до конца года так и не возобновился.

КОНТРОЛЬ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОТОКОВ

В 2021 г. химический состав воды водотоков формировался в условиях гидрологического года средней маловодности. В качестве основных индикаторов загрязнения воды в каналах ТКВ и в р. Тече использовались объёмная активность (ОА) ^{90}Sr и концентрация сульфатов, а для воды в районе р. Мишеляк – ОА ^{90}Sr и концентрация нитратов. Результаты всех химических и радиохимических измерений проб поверхностных вод, отобранных на контролируемых водотоках, приведены в работе [1]. Ниже приводится расчёт стока ^{90}Sr и краткий анализ полученных результатов.

Водный и радиоактивный сток по ЛБК и ПБК

В 2021 г. на всей протяжённости ЛБК и при всех расходах воды значения ОА ^{90}Sr не превышали уровня вмешательства УВ (4,9 Бк/л). В замыкающем створе ЛБК в течение года максимальная ОА ^{90}Sr составила 1,5 Бк/л, а средняя за год – 0,60 Бк/л. Такие низкие показатели ОА ^{90}Sr были обеспечены за счёт поддержания уровня воды в зоне подпора ШР-1-ЛБК в рамках установленного регламента эксплуатации ГТС. По результатам гидрохимических наблюдений в замыкающем створе ПБК активность ^{90}Sr в течение года превысила УВ один раз (15,0 Бк/л), а в среднем была 2,9 Бк/л, что значительно ниже показателей предыдущих лет.

В табл. 1 приведены помесечные данные объёма водного стока, ОА и радиоактивного стока ^{90}Sr по ЛБК (г/с-3) и ПБК (г/с-8) за 2021 г.

Река Теча

В табл. 2 приведены помесечные данные объёма водного стока, ОА и радиоактивного стока в верховье р. Течи (г/с-9) за 2021 г. в сравнении с соответствующими данными о суммарном стоке через ЛБК и ПБК.

Радиоактивное загрязнение вод р. Течи формировалось при среднемесечных расходах от 0,15 до 1,49 м³/с. Суммарный годовой сток ^{90}Sr в верхнем створе р. Течи в 2021 г. составил 106 ГБк (2,86 Ки). Годовой сток воды по каналам в 2021 г. составил 94 % от стока реки, а суммарный сток ^{90}Sr по ЛБК и ПБК – всего около 17 % от общего стока по г/с-9.

В табл. 3 приведены данные о годовом радиоактивном стоке ^{90}Sr в верховье р. Течи (г/с-9) в сравнении с соответствующими данными о суммарном стоке через ЛБК и ПБК за весь период наблюдений 2017–2021 гг.

За весь период наблюдений фиксируется постоянное значительное превышение стока ^{90}Sr по р. Тече в сравнении с суммарным стоком ^{90}Sr по каналам (табл. 3). Причём это превышение практически не зависит от уровня воды в водоеме В-11 и от стока ^{90}Sr по каналам. Очевидно, что существующий дополнительный приток ^{90}Sr в р. Тече обусловлен фильтрацией загрязнённой воды из водоема В-11 под

Таблица 1

Объём водного стока, объёмная активность и радиоактивный сток ^{90}Sr по ЛБК (г/с-3) и ПБК (г/с-8) за 2021 г.

| Месяц | ЛБК (г/с-3) | | | ПБК (г/с-8) | | |
|----------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| | Водный сток, млн м ³ | ОА ^{90}Sr , Бк/л | Сток ^{90}Sr , ГБк | Водный сток, млн м ³ | ОА ^{90}Sr , Бк/л | Сток ^{90}Sr , ГБк |
| Январь | 0,474 | 0,19 | 0,090 | 0,380 | 0,54 | 0,205 |
| Февраль | 0,431 | 0,18 | 0,0776 | 0,254 | 0,38 | 0,097 |
| Март | 0,581 | 0,44 | 0,256 | 0,372 | 4,10 | 1,53 |
| Апрель | 2,33 | 0,38 | 0,839 | 0,775 | 1,00 | 0,775 |
| Май | 1,48 | 1,00 | 1,48 | 0,680 | 0,98 | 0,666 |
| Июнь | 0,645 | 0,43 | 0,277 | 0,632 | 3,80 | 2,40 |
| Июль | 0,217 | 1,01 | 0,219 | 0,600 | 1,50 | 0,900 |
| Август | 0,123 | 1,50 | 0,185 | 0,300 | 2,40 | 0,720 |
| Сентябрь | 0,134 | 1,30 | 0,174 | 0,181 | 2,00 | 0,362 |
| Октябрь | 0,131 | 0,24 | 0,031 | 0,249 | 2,20 | 0,548 |
| Ноябрь | 0,629 | 0,12 | 0,075 | 0,695 | 1,30 | 0,904 |
| Декабрь | 0,512 | 0,59 | 0,030 | 0,321 | 15,0 | 4,82 |
| Всего | 7,69 | — | 4,01 | 5,44 | — | 13,9 |

Таблица 2

Сравнение водного и радиоактивного стока ^{90}Sr по р. Тече (г/с-9) с соответствующим суммарным стоком по ЛБК и ПБК за 2021 г.

| Месяц | р. Теча (г/с-9) | | | Сумма ЛБК и ПБК | | Разность | |
|----------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| | Водный сток, млн м ³ | ОА ^{90}Sr , Бк/л | Сток ^{90}Sr , ГБк | Водный сток, млн м ³ | Сток ^{90}Sr , ГБк | Водный сток, млн м ³ | Сток ^{90}Sr , ГБк |
| Январь | 0,81 | 8,6 | 7,0 | 0,854 | 0,295 | -0,044 | 6,71 |
| Февраль | 0,75 | 2,7 | 2,0 | 0,685 | 0,174 | 0,065 | 1,83 |
| Март | 1,08 | 4,3 | 4,6 | 0,953 | 1,79 | 0,127 | 2,81 |
| Апрель | 2,66 | 3,7 | 9,8 | 3,11 | 1,64 | 0,445 | 8,16 |
| Май | 3,27 | 4,1 | 13,4 | 2,16 | 2,15 | 1,11 | 11,3 |
| Июнь | 1,64 | 8,3 | 13,6 | 1,28 | 2,68 | 0,36 | 10,9 |
| Июль | 0,81 | 12,0 | 9,72 | 0,817 | 1,12 | -0,007 | 8,60 |
| Август | 0,44 | 26,0 | 11,4 | 0,423 | 0,905 | 0,02 | 10,5 |
| Сентябрь | 0,20 | 15,0 | 3,0 | 0,315 | 0,536 | -0,115 | 2,46 |
| Октябрь | 0,25 | 25,0 | 6,25 | 0,380 | 0,580 | -0,13 | 5,67 |
| Ноябрь | 1,15 | 5,8 | 6,67 | 1,32 | 0,98 | -0,17 | 5,69 |
| Декабрь | 0,84 | 22,0 | 18,5 | 0,833 | 5,12 | 0,007 | 13,4 |
| Всего | 13,9 | — | 106,0 | 13,1 | 17,9 | 0,80 | 88,1 |

основанием плотины П-11 и/или десорбцией ^{90}Sr из заболоченной поймы реки в районе г/с-9. Среднегодовая ОА ^{90}Sr в воде этого дополнительного источника загрязнения в 2021 г. составляла ~ 110 Бк/л, а годовой объём притока воды – $\sim 0,8$ млн м^3 .

Река Мишеляк

Загрязнение поверхностных вод реки Мишеляк на участке предполагаемой разгрузки южной ветви ореола подземных вод от ПХ РАО В-9 контролировалось на водопостах в/п-20 и в/п-21 (рис. 1). Результаты ежемесячных наблюдений показали, что содержание в пробах воды нитрат-иона и ^{90}Sr как индикаторов радиоактивного загрязнения в течение 2021 г. изменялось в следующих пределах:

- на в/п-20 (нижний створ): нитрат-ион – $0,14\text{--}8,6$ мг/л, ^{90}Sr – $0,08\text{--}0,68$ Бк/л;
- на в/п-21 (верхний створ): нитрат-ион – $0,28\text{--}9,8$ мг/л, ^{90}Sr – $0,07\text{--}0,55$ Бк/л.

В течение 2021 г. в воде р. Мишеляк ОА ^{90}Sr не превышала $0,7$ Бк/л.

В течение всего года наблюдается тесная корреляционная связь как между водопостами – отдельно по содержанию нитратов и ОА ^{90}Sr , так и на каждом из водопостов – между концентрацией нитрат-иона и ОА ^{90}Sr [1]. Причём на в/п-20 коэффициент корреляции между содержанием нитратов и ОА ^{90}Sr достигал 90 %.

Практически одинаковые (в пределах экспериментальной погрешности) уровни загрязнения воды и синхронный характер изменения содержания нитратов и ОА ^{90}Sr на входном и выходном створах контролируемого участка р. Мишеляк показывают, что основной источ-

ник этих индикаторов загрязнения расположен выше предполагаемого участка разгрузки подземных вод от ПХ РАО В-9 в поверхностные воды реки. Наиболее вероятным источником загрязнения воды р. Мишеляк является поверхностный сток с ранее загрязнённой площади водосбора реки.

АНАЛИЗ РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ ШЛЮЗОВ-РЕГУЛЯТОРОВ НА ЛБК И ПБК

Как видно из табл. 3, в 2021 г. сток ^{90}Sr на ЛБК и ПБК был минимальным за последние 5 лет наблюдений (период эксплуатации ШР). Поступление загрязнённых вод из водоёма В-11 в каналы зависит от уровня воды в водоёме и эффективности эксплуатации ШР. Выполненные исследования показывают, что эксплуатация ШР на каналах в целом даёт положительные результаты по снижению поступления ^{90}Sr в ЛБК, ПБК и далее в открытую гидрографическую сеть р. Течи. Рассмотрим эту ситуацию более подробно.

Правобережный канал

С началом эксплуатации ШР-2-ПБК в 2017 г. годовой сток ^{90}Sr неуклонно снижался и в 2021 г. достиг 14 ГБк (табл. 3). Практически в течение всего 2021 г. уровень воды в зоне подпора ШР-2 (на подтверждённом участке фильтрации загрязнённых вод из В-11 в ПБК) был сопоставим или выше, чем уровень в водоёме В-11 (рис. 3). Исключение составили только три периода (месяца) опробования, когда на момент выполнения измерений уровень воды в ПБК был ниже уровня В-11. В основном же в течение всего года изменения ОА ^{90}Sr в районе

Таблица 3

Радиоактивный сток ^{90}Sr по ЛБК (г/с-3), ПБК (г/с-8) и р. Тече (г/с-9) за 2017–2021 гг., ГБк/год

| Пункт контроля | Год | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
| ЛБК (г/с-3) | 52,0 | 35,0 | 15,0 | 5,2 | 4,0 |
| ПБК (г/с-8) | 100,0 | 52,0 | 33,0 | 19,0 | 14,0 |
| ЛБК+ПБК | 152,0 | 87,0 | 48,0 | 24,0 | 18,0 |
| р. Теча (г/с-9) | 202,0 | 150,0 | 115,0 | 120,0 | 106,0 |
| р. Теча – ЛБК – ПБК | 50,0 | 63,0 | 67,0 | 96,0 | 88,0 |

ШР-1 (г/с-7) и в нижнем бьефе ШР-2 (г/с-8) носили синхронный характер (рис. 3).

В ПБК ОА ^{90}Sr в течение 2021 г. варьировала от 0,4 до 15,0 Бк/л. Пиковые значения ОА ^{90}Sr в зоне подпора ШР, а особенно в нижнем бьефе, приурочены к периодам снижения уровня воды в верхнем бьефе. В этих случаях увеличивается градиент потока подземных вод через тело дамбы по линии В-11 – ПБК, что приводит к увеличению фильтрации загрязнённых вод из водоёма В-11 в канал. Максимальная ОА ^{90}Sr в ПБК была зафиксирована в декабре (15 Бк/л), когда по техническим причинам произошло продолжительное открытие затвора ШР-2 и, соответственно, снижение уровня воды в верхнем бьефе на 1,5 м ниже регламентного.

Левобережный канал

Следует отметить, что в 2021 г. объём годового водного стока по ЛБК и р. Тече был

минимальным за последние 22 года. Анализ водного стока по ЛБК за период эксплуатации ШР-1 выявил потерю водного стока на участке ШР-1 выявил потерю водного стока на участке от г/с-14 до г/с-3, то есть в зоне подпора ШР-1. В 2021 г. потеря водного стока оценивается в 6,5 млн м³. Одновременно на данном участке ЛБК отмечается рост уровней подземных вод в скважинах, расположенных вблизи северного берега канала [1]. Очевидно, что существует взаимосвязь поверхностных и подземных вод, и потери поверхностного стока каналов возникли в результате роста уровня воды в канале, увеличения градиента потока подземных вод, формирующегося от канала в противоположную (северную) от водоёма В-11 сторону.

В воде ЛБК ОА ^{90}Sr в течение 2021 г. изменялась от 0,2 до 1,6 Бк/л, что значительно ниже уровня вмешательства (4,9 Бк/л) и значительно ниже ОА ^{90}Sr в воде ПБК. Уровень воды в зоне подпора ШР-1-ЛБК практически всегда был выше уровня в водоёме В-11.

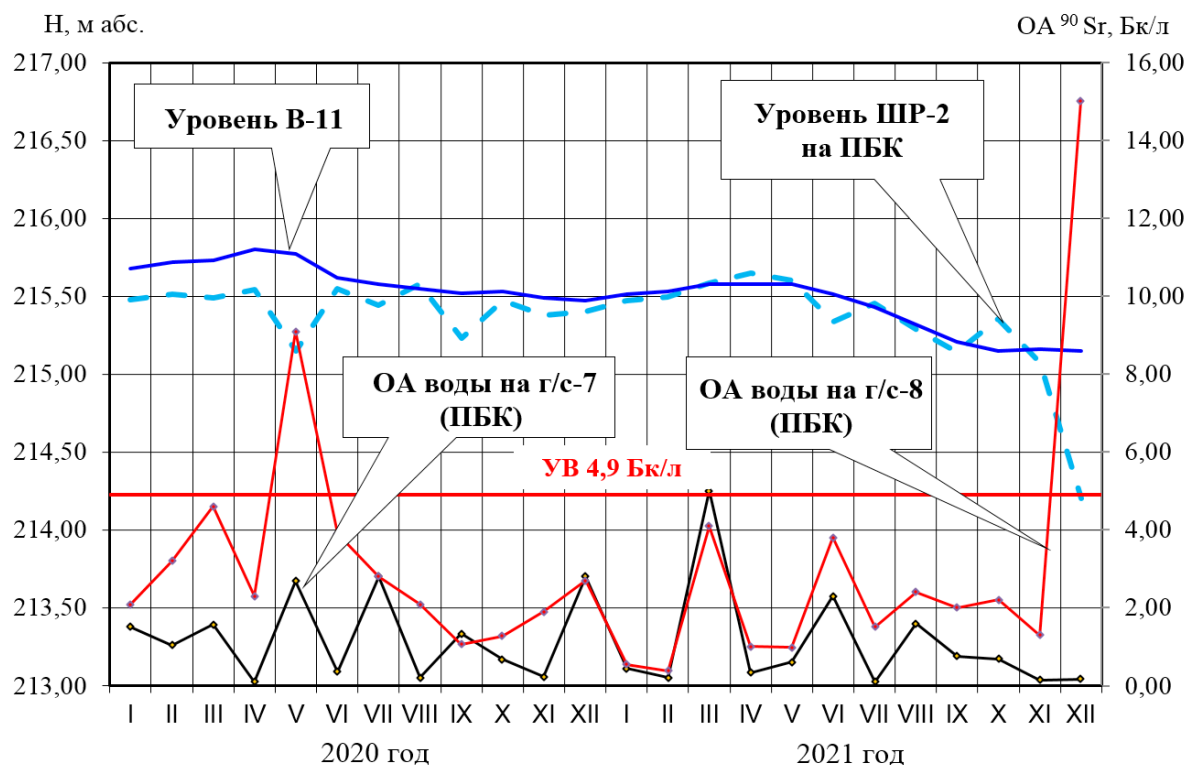


Рис. 3. Изменение уровня воды водоёма В-11 и в верхнем бьефе ШР-2-ПБК в сравнении с ОА ^{90}Sr в воде на г/с-8 и г/с-7 ПБК

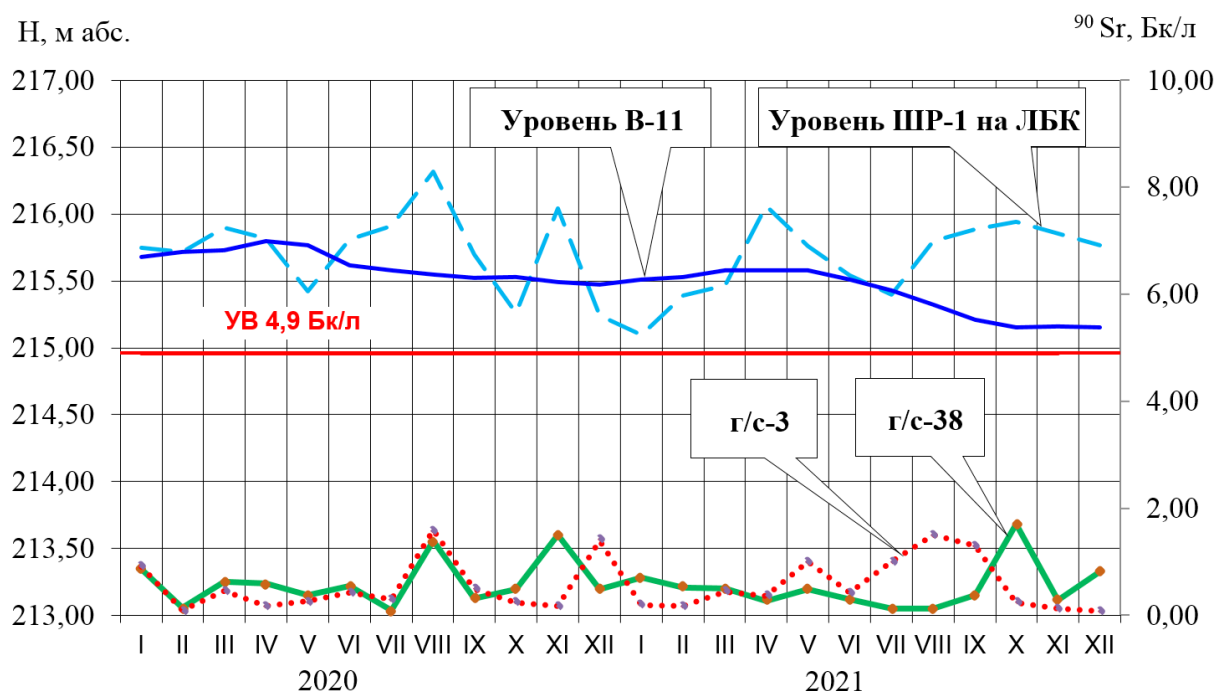


Рис. 4. Изменение уровня воды водоёма В-11 и в верхнем бьефе ШПР-1-ЛБК в сравнении с ОА ^{90}Sr в воде на г/с-3 и г/с-38 ЛБК

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Гидрологический и гидрогеологический мониторинг, осуществляемый партией № 10 Филиала "Гидрогеологическая экспедиция № 30" ФГБУ "Гидроспецгеология" в районе размещения ТКВ, является важной составной частью общей системы радиоэкологического мониторинга, выполняемого на площадке ФГУП "ПО "Маяк".

2. Проведение гидрологического мониторинга и непрерывный контроль загрязнения поверхностных вод являются основным методом наблюдения за текущим состоянием и обеспечением безопасности водоёмов ТКВ и оценки эффективности реализуемых на предприятии практических реабилитационных мероприятий (эксплуатация шлюзов-регуляторов, создание противofiltrационных завес и др.).

3. Результаты мониторинга необходимы

для оценки, анализа и долговременного научно обоснованного прогноза изменения радиоэкологического состояния объектов окружающей среды и обеспечения безопасности в районе расположения ФГУП "ПО "Маяк".

4. Полученные результаты показывают, что радиоэкологическая обстановка в районе расположения ТКВ остаётся стабильной с отчётливой тенденцией к улучшению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Режимные гидрогеологические наблюдения за распространением загрязнения в подземных водах в пределах контролируемой зоны ПО "Маяк": Отчёт по ПИР 2021 г. / Фонды ФГБУ "Гидроспецгеология".
2. Режимные гидрологические наблюдения на поверхностных водотоках в пределах контролируемой зоны ФГУП "ПО "Маяк": Отчёт по ПИР 2021 г. / Фонды ФГБУ "Гидроспецгеология".

УДК 504.064

© 2022

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОРГАНИЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ФГУП "ПО "МАЯК" В 2021 ГОДУ

*Ю.Г. Мокров, К.Ю. Мокров, А.Е. Дементьева
Россия, г. Озёрск, ФГУП "ПО "Маяк"*

Показано, что всего, по данным инвентаризации 2018 г., на ФГУП "ПО "Маяк" зарегистрировано 31 высокий источник выбросов (ИВ), откуда в атмосферу поступает 28 радиоактивных веществ (РВ), и 381 низкий ИВ, из которых выделяется 9 РВ. Приведены результаты контроля выбросов РВ в атмосферу из труб предприятия за 2021 г. в сравнении с установленными нормативами предельно допустимых выбросов (ПДВ). Отмечено, что нормативы ПДВ научно обоснованы и включают значения допустимых выбросов (ДВ), а также контрольных уровней (КУ) выброса.

Для текущих выбросов РВ ФГУП "ПО "Маяк" выполнена оценка дозового воздействия на население зоны наблюдения (ЗН) и персонал на промышленной площадке (ПП) предприятия. Указывается, что текущие выбросы радионуклидов из всех организованных ИВ не оказывают значимого влияния на радиационную обстановку в районе расположения предприятия, имеют стабильный характер и характеризуются тенденцией к снижению, а дозовое воздействие на население в ближайших к предприятию населённых пунктах не превышает 5 мкЗв/год (0,5 % от предела эффективной дозы (ЭД) для населения, регламентированного НРБ-99/2009).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИСТОЧНИК ВЫБРОСА, РАДИОНУКЛИД, АТМОСФЕРА, ОБЪЁМНАЯ АКТИВНОСТЬ, ДОПУСТИМЫЙ ВЫБРОС, ЭФФЕКТИВНАЯ ДОЗА, НАСЕЛЕНИЕ

ФГУП "ПО "Маяк" расположено на севере Челябинской области в районе г. Кыштыма и г. Касли на территории ЗАТО г. Озёрск (рисунок). В состав ЗАТО г. Озёрск входят населённые пункты: г. Озёрск (население 85 тыс. чел.), пос. Новогорный (7100 чел.), пос. Метлино (4100 чел.) и др. [1]. Основные производственные подразделения предприятия, работа которых связана с выбросами в атмосферу загрязняющих веществ, расположены на изолированной промышленной площадке (ПП), которая имеет площадь ~250 км². Границы санитарно-защитной зоны (СЗЗ) совпадают с границами ПП, а зона наблюдения (ЗН) имеет площадь ~1800 км².

На предприятии расположены следующие производства атомной промышленности: реакторное, радиохимическое, химико-металлургическое, изотопное, химическое и различные вспомогательные подразделения [1]. В результате их деятельности в атмосферу вы-

брасывается широкий спектр радионуклидов активационного и осколочного происхождения. Для реакторного производства характерен выброс инертных радиоактивных газов (ИРГ), изотопов йода и нуклидов активационного происхождения (⁵¹Cr, ⁶⁰Co и др.), для химико-металлургического производства – выброс долгоживущих нуклидов группы актиноидов (уран, плутоний и др.), для изотопного и радиохимического производства – выброс изотопов плутония (²³⁸Pu, ²³⁹Pu), стронция (⁹⁰Sr), цезия (¹³⁷Cs) и ряда других нуклидов осколочного происхождения [1].

Таким образом, в условиях совместного выброса нуклидов с различными радиационными характеристиками и большим числом высоких источников может формироваться сложная картина загрязнения прилегающей территории.

В современной системе нормирования выбросов основным параметром является предельно допустимый выброс (ПДВ) [2].

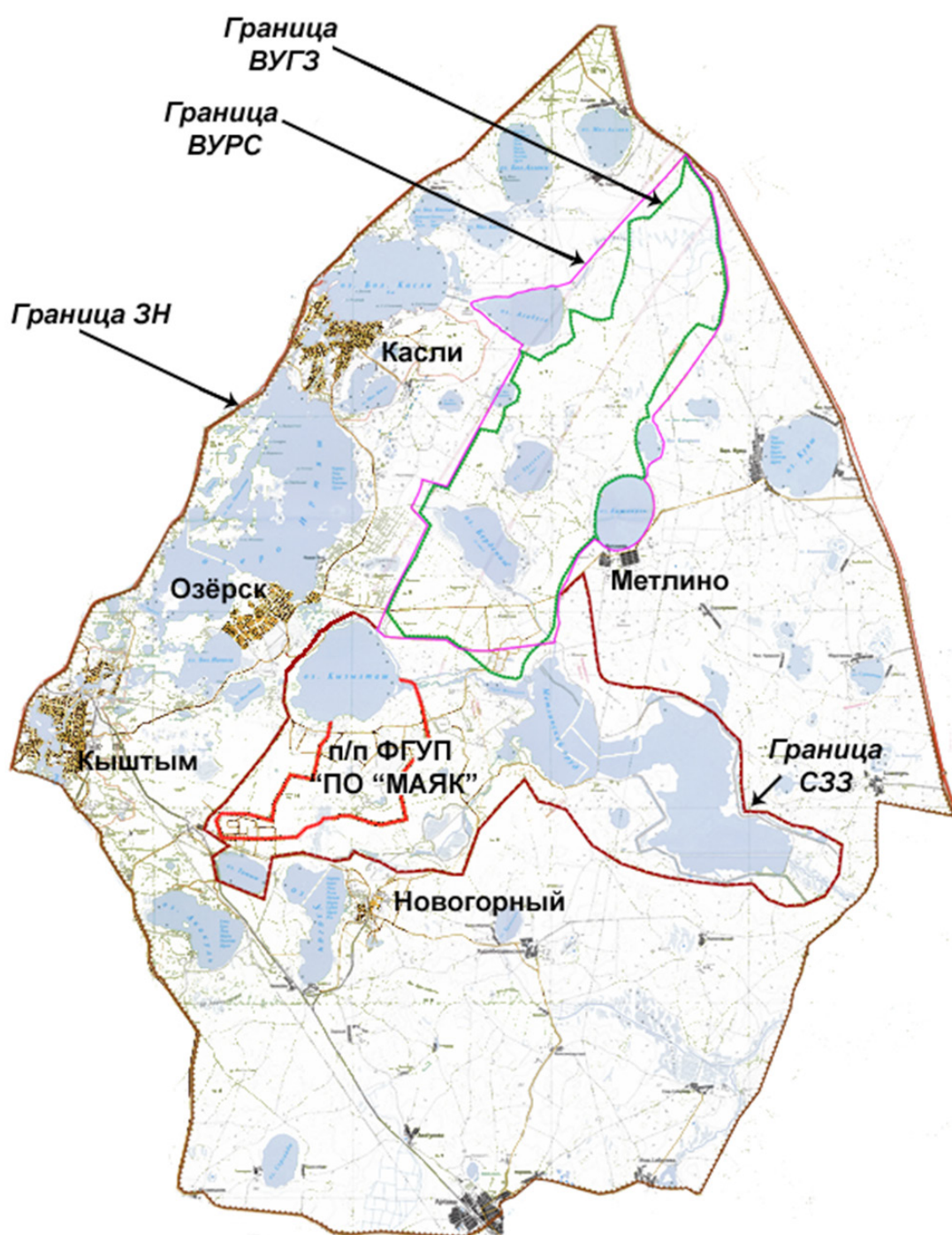


Рисунок. Карта-схема территории зоны наблюдения ФГУП "ПО "Маяк"

Значение ПДВ определяется на основе совокупного действия всех радионуклидов и ИВ предприятия и для каждого ИВ численно равно выбросу, при котором в "критической точке" (точке с максимальным совокупным дозовым воздействием) годовая доза облучения достигает своего предела с учётом всех путей внешнего и внутреннего облучения.

В работе приведены результаты контроля выбросов радионуклидов в атмосферу из труб предприятия за 2021 г. в сравнении с установленными нормативами ДВ.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСТОЧНИКОВ ВЫБРОСОВ

В каждом структурном подразделении предприятия, где проводятся работы с радиоактивными веществами (РВ) и/или радиоактивными отходами (РАО), неизбежно образуются источники выделения газообразных радиоактивных отходов, которые после газоочистки подлежат удалению в атмосферу через высокие и/или низкие трубы (источники выбросов) в атмосферный воздух. Параметры ИВ ФГУП "ПО "Маяк" определены и обобщены по итогам инвентаризации, проведённой в 2018 г. (табл. 1) [1]. Для каждого источника задаются его технологические характеристики: объёмный расход и температура выбрасываемой газовоздушной смеси (ГВС), высота и диаметр устья трубы, а также координаты расположения ИВ в локальной системе координат.

Все ИВ предприятия условно разделены на две группы:

- высокие (до 150 м) ИВ, зона влияния которых распространяется далеко за пределы ПП предприятия (до 50–100 км);

- низкие (на уровне высоты ближайшего здания) ИВ, выбросы которых частично или полностью попадают в зону аэродинамической тени от близлежащих зданий в районе ПП.

Часть высоких и низких ИВ являются многоствольными, т.е. в полости источника большего диаметра расположено несколько источников с меньшими диаметрами. По режиму работы ИВ принято разделять на:

- вентиляционные выбросы непрерывного действия из помещений III зоны, которые характеризуются малой объёмной активностью

Таблица 1

Количество источников выброса радионуклидов в атмосферу в различных подразделениях ФГУП "ПО "Маяк" (2018 г.) [1]

| Подразделение | Количество источников выброса | |
|---|-------------------------------|--------|
| | Высокие | Низкие |
| Реакторный завод (РЗ) | 4 | 4 |
| Радиохимический завод (РХЗ) | 16 | 345 |
| Химико-металлургический завод (ХМЗ) | 5 | 22 |
| Радиоизотопный завод (РИЗ) | 1 | 5 |
| Химический завод (ХЗ) | 5 | – |
| Служба экологии (СЭ) | – | – |
| Центральная заводская лаборатория (ЦЗЛ) | – | 5 |
| ВСЕГО | 31 | 381 |

(ОА) при больших валовых объёмах выброса ГВС;

- технологические выбросы (сдувки) периодического действия, которые характеризуются более высокими значениями ОА, но малым расходом ГВС.

На выброс в высокие ИВ, как правило, направляются наиболее мощные технологические сдувки и максимальные по объёму вентиляционные выбросы.

В низкие источники главным образом поступает вентиляционный воздух из помещений II и III зон небольших производственных и административных зданий, складов, отделений хранения продукции, бытовых помещений, санпропускников, спецпрачечных, механических мастерских, сдувок "дыхания" мерного хозяйства. Высота таких источников составляет от 2 до 30 м от уровня земли. Почти все они расположены на крышах корпусов либо выходят с торцевых частей зданий.

ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ ГАЗООЧИСТКИ

Функционирующая на предприятии современная система газоаэрозольной очистки

(СГАО) состоит из нескольких тысяч аппаратов и полностью отвечает передовому научно-техническому уровню не только в стране, но и в мире. Для очистки выбрасываемых в атмосферу газозвдушных смесей (ГВС) на ФГУП "ПО "Маяк" используются различные технологические процессы и устройства, обеспечивающие гарантированное выполнение нормативов очистки (эффективность систем газоаэрозольной очистки достигает 99,999 %):

- выдержка радиоактивных газов в газгольдерах высокого и низкого давления для снижения активности короткоживущих изотопов до допустимого уровня;
- очистка радиоактивных аэрозолей с использованием фильтрующих установок;
- улавливание радиоактивных летучих форм изотопов йода с помощью сорбционных колонн.

Многоступенчатая СГАО основана на использовании различных физико-химических процессов и в зависимости от типа технологических источников выделения и физико-химической формы РН может включать: СОТАР (суперосадитель тонких аэрозолей с регенерацией), ФАРТОС (фильтр аэрозольный регенерируемый тонкой очистки стекловолокнистый), ФАС (фильтр аэрозольный самоочищающийся), ФПА (фильтр Петрянова ацетилцеллюлозный), ФПП (фильтр Петрянова перхлорвиниловый), угольные колонны (УК) и др.

На предприятии проходит постоянная модернизация системы очистки с применением новых, более эффективных моделей фильтров и материалов, которые в соответствии с требованиями федеральных норм и правил не поддерживают горение. Все основные газоочистные аппараты, как правило, дублированы. Выброс в атмосферу очищенного воздуха осуществляется через высокие (до 150 м) трубы (ВТ) после прохождения СГАО. При этом практически все радионуклиды, находящиеся в традиционной аэрозольной форме (с размером частиц более 0,3 мкм), задерживаются системой газоочистки.

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ

Для определения мощности выброса РВ из ИВ, как правило, используются прямые ин-

струментальные методы с отбором проб ГВС за время от нескольких часов до 10 сут с последующим лабораторным анализом содержания радионуклидов в пробах. Инструментальные методы анализа отобранных проб (спектрометрические, радиометрические) применяются в соответствии с отраслевыми стандартами, руководящими документами и методиками предприятия и используются для всех высоких ИВ, подлежащих постоянному штатному контролю. Для смеси α -излучающих радионуклидов методами радиометрии определяется их суммарная активность без определения радионуклидного состава смеси. При этом, в соответствии с консервативными принципами, вся активность приписывается ^{239}Pu как наиболее радиотоксичному радионуклиду. Если измеряемая в пробе активность γ -излучающих нуклидов ниже предела обнаружения, измеряется скорость счёта β -частиц с последующим приписыванием суммарной активности пробы ^{90}Sr как наиболее радиотоксичному из β -излучающих нуклидов.

С точки зрения оценки дозового воздействия выбросов на население прилегающих районов такой учёт суммарной активности α -, β -излучателей носит консервативный (завышенный) характер. Однако для оперативного контроля работы технологического оборудования газоочистных систем существующая система вполне себя оправдывает как с методической стороны, так и с точки зрения измерений.

Объёмная активность инертных радиоактивных газов (ИРГ) на РЗ определяется как в статическом режиме работы (методами γ -спектрометрии путём измерения проб газа, отбираемых в кюветы), так и в динамическом режиме с помощью ионизационных камер проточного типа.

Расчётный метод используется на РХЗ для определения мощности выброса трития и ^{85}Kr , выделяющихся при растворении облучённого ядерного топлива.

Система контроля выбросов (СКВ) РН в атмосферу предназначена для:

- контроля соблюдения нормативов ПДВ и ДВ;
- обнаружения источников повышенных и аварийных выбросов;
- контроля работы технологического оборудования и СГАО;

- контроля загрязнения ПСА на территории ПП и зоны наблюдения (ЗН);
- оценки опасности аварийных выбросов РВ для населения и объектов окружающей среды (ОС).

Конечной целью контроля загрязнения ОС является уменьшение ущерба здоровью людей и биоте. Система контроля соблюдения нормативов ПДВ и ДВ на ПО "Маяк" включает:

- непрерывный контроль выбросов РВ в атмосферу на всех высоких и дающих максимальный вклад в суммарную мощность выброса низких источников;

- периодический контроль выбросов РВ из маломощных низких источников;

- инспекционный контроль выбросов РВ в рамках специальных программ и исследовательских работ;

- постоянный контроль содержания РВ в воздухе рабочей зоны производственных помещений, из которых примесь по системам вентиляции поступает в атмосферу;

- постоянный контроль уровня загрязнения ПСА с непрерывным отбором проб воздуха и с последующим определением ОА радиоактивных аэрозолей на территории всех основных подразделений ФГУП "ПО "Маяк" с использованием стационарных воздухозаборных установок;

- постоянный контроль уровня загрязнения ПСА с непрерывным отбором проб воздуха и последующим определением ОА радиоактивных аэрозолей в пунктах контроля на территории ПП (СЗЗ) и в ЗН с использованием конусов (индикаторный метод);

- постоянный контроль выпадений (отложений на почву) радиоактивных аэрозолей на территории каждого подразделения, а также в СЗЗ и ЗН с использованием планшетов и сравнение результатов с установленными административными пределами;

- периодический и инспекционный контроль состояния ПСА на территории ПП (СЗЗ) и в ЗН с использованием передвижных постов контроля;

- постоянный контроль выбросов с использованием объектовых автоматизированных систем контроля технологических процессов.

Например, на РХЗ для контроля технологических параметров газоочистных систем,

систем вентиляции воздуха и выбросов радионуклидов в атмосферу используют двухуровневую систему контроля:

1. Технологический оперативный контроль осуществляется в реальном режиме времени с использованием автоматизированной системы радиационного контроля МАИС, которая предусматривает проведение относительных интегральных измерений активности (скорости счёта) суммы α -, β - и γ -излучающих нуклидов, накопленной на аналитическом аэрозольном фильтре (АФ) с помощью устройств детектирования. Альфа-, β - и γ -частицы, испускаемые радионуклидами, накопленными на фильтре, регистрируются специальными детекторами, преобразуются в импульсы тока, а информация о скорости счёта передаётся в автоматизированную систему. Далее информация обрабатывается и поступает на верхний уровень системы (автоматизированное рабочее место оператора). Вся информация накапливается в компьютерной базе данных (архивируется) и может быть представлена в виде таблиц, графиков и диаграмм.

2. Штатный контроль выбросов предусматривает непрерывный отбор из контролируемого воздушного потока небольшой части объёма воздуха через специальную пробоотборную трубку (систему), накопление радиоактивных аэрозолей на АФ, периодическую замену фильтра, проведение в лабораторных условиях спектрометрических измерений активности отдельных радионуклидов, накопленных на АФ, и расчёт значений интегральных выбросов за время экспозиции фильтра.

НОРМИРОВАНИЕ ВЫБРОСОВ

По результатам инвентаризации ИВ было показано [1], что на ФГУП "ПО "Маяк" действует 31 высокий источник выбросов, откуда в атмосферу поступает 28 радионуклидов, и 381 низкий источник выбросов, через которые в атмосферу поступает 9 радионуклидов. Показано, что для высоких ИВ наибольший вклад по выбрасываемой активности практически по всем нуклидам вносит РХЗ [3]. Обоснование нормативов ПДВ проведено по критерию годовой индивидуальной эффективной дозы (ЭД). Дополнительно выполнена оценка значений

эквивалентных доз на отдельные критические органы (поверхность кожи, хрусталик глаза, кисти рук и стопы), показана справедливость подхода к обоснованию нормативов ПДВ на основе годовой ЭД. Установлены сопряжённые нормативы (ДВ) и административные пределы – контрольный уровень выброса (КУВ) [3].

В соответствии с методикой [2], ПДВ устанавливаются для каждого ИВ организации, суммарный выброс которого создаёт без учёта рассеивания в атмосфере ЭД более 10 мкЗв, и для всех радионуклидов, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны ОС, суммарный вклад которых в годовую ЭД облучения лиц из критической группы населения, создаваемую выбросом этого источника, составляет не менее 99 %. В рамках обоснования нормативов ПДВ на предприятии выполнена проверка данных условий и показана необходимость нормирования выбросов из всех высоких источников. Перечень нуклидов, подлежащих нормированию и контролю, представлен в табл. 2. Остальные нуклиды, чей относительный вклад в полную ЭД облучения населения составляет менее 1 %, подпадают под условия отсутствия необходимости установления нормативов ПДВ и, соответственно, освобождения от осуществления производственного контроля.

Значения ДВ устанавливаются для каждого нуклида:

- от двух до десяти раз ниже соответствующих ПДВ для высокого ИВ;
- от 10 до 1000 раз ниже соответствующих ПДВ для низкого ИВ.

Для обеспечения условий, при которых радиационное воздействие от выбросов будет гарантированно ниже допустимого, и для оперативного реагирования на изменение радиационной обстановки на предприятии утверждаются административные пределы (КУВ). Значения КУВ устанавливаются с учётом уже достигнутого уровня радиационного воздействия на предприятии, эффективности мероприятий по улучшению радиационной обстановки и результатов радиационного контроля, включая данные о динамике выбросов с учётом их неравномерности во времени, об условиях работы, о состоянии ПСА и подстилающей поверхности, других объектов ОС.

Таблица 2

Выбросы РВ из труб ФГУП "ПО "Маяк" за 2019–2021 гг. в сравнении с нормативами ДВ, Бк/год

| Радионуклид | ДВ, Бк | Годовой выброс РВ, Бк | | |
|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | | 2019 г. | 2020 г. | 2021 г. |
| ³ H | $1,90 \cdot 10^{16}$ | $1,53 \cdot 10^{15}$ | $1,47 \cdot 10^{15}$ | $1,27 \cdot 10^{15}$ |
| ⁴¹ Ar | $5,83 \cdot 10^{14}$ | $2,38 \cdot 10^{13}$ | $2,69 \cdot 10^{13}$ | $2,81 \cdot 10^{13}$ |
| ⁸⁵ Kr | $4,07 \cdot 10^{17}$ | $4,10 \cdot 10^{16}$ | $4,20 \cdot 10^{16}$ | $4,19 \cdot 10^{16}$ |
| ^{85m} Kr | $2,19 \cdot 10^{14}$ | 0 | 0 | $1,80 \cdot 10^{11}$ |
| ¹³³ Xe | $4,66 \cdot 10^{14}$ | 0 | $1,44 \cdot 10^{11}$ | $2,00 \cdot 10^{12}$ |
| ¹³⁵ Xe | $3,21 \cdot 10^{14}$ | $2,62 \cdot 10^{12}$ | $2,91 \cdot 10^{12}$ | $6,79 \cdot 10^{12}$ |
| ⁶⁰ Co | $6,96 \cdot 10^8$ | $7,13 \cdot 10^5$ | $2,79 \cdot 10^5$ | $1,47 \cdot 10^5$ |
| ⁹⁰ Sr | $9,55 \cdot 10^{10}$ | $3,56 \cdot 10^8$ | $4,08 \cdot 10^8$ | $3,56 \cdot 10^8$ |
| ⁹⁵ Zr | $1,09 \cdot 10^9$ | $6,52 \cdot 10^5$ | $3,08 \cdot 10^5$ | $5,30 \cdot 10^6$ |
| ⁹⁵ Nb | $4,45 \cdot 10^8$ | $6,52 \cdot 10^5$ | $3,08 \cdot 10^5$ | $5,30 \cdot 10^6$ |
| ¹⁰⁶ Ru | $4,05 \cdot 10^{10}$ | $6,79 \cdot 10^8$ | $6,96 \cdot 10^8$ | $1,77 \cdot 10^8$ |
| ¹²⁵ Sb | $3,48 \cdot 10^9$ | $4,66 \cdot 10^7$ | $2,27 \cdot 10^7$ | $2,26 \cdot 10^7$ |
| ¹³¹ I | $7,48 \cdot 10^{11}$ | $6,86 \cdot 10^7$ | $4,58 \cdot 10^7$ | $5,67 \cdot 10^7$ |
| ¹³⁴ Cs | $1,08 \cdot 10^{10}$ | $3,61 \cdot 10^7$ | $4,56 \cdot 10^7$ | $5,67 \cdot 10^7$ |
| ¹³⁷ Cs | $6,83 \cdot 10^{10}$ | $9,19 \cdot 10^8$ | $1,46 \cdot 10^9$ | $1,42 \cdot 10^9$ |
| ¹⁴⁴ Ce | $1,36 \cdot 10^{10}$ | $2,72 \cdot 10^7$ | $1,26 \cdot 10^8$ | $1,74 \cdot 10^8$ |
| ¹²⁹ I | $4,79 \cdot 10^{11}$ | $2,58 \cdot 10^{10}$ | $3,49 \cdot 10^{10}$ | $5,12 \cdot 10^{10}$ |
| ²³⁹ Pu * | $1,03 \cdot 10^{10}$ | $7,41 \cdot 10^8$ | $5,44 \cdot 10^8$ | $5,23 \cdot 10^8$ |

Примечание. * Сумма α-излучающих радионуклидов.

В пределах установленных КУВ администрацией предприятия и отдельного структурного подразделения могут устанавливаться эксплуатационные КУВ (для отдельных источников и/или их совокупности): годовые, месячные, декадные, суточные, исходя из изложенных выше принципов, с учётом текущего уровня выбросов для отслеживания работы производства, в соответствии с регламентом, предотвращения нештатных ситуаций и оперативного реагирования на их возникновение.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ

В табл. 2 приведены результаты контроля выбросов РВ в атмосферу в 2021 г. в сравнении с установленным допустимым выбросом (ДВ) и выбросами за 2019 и 2020 гг.

Из табл. 2 видно, что годовые выбросы РВ не превышают установленных для предприятия нормативов ДВ и находятся на среднемного-летнем уровне.

В работе [3] было показано:

1. Дозовое воздействие на население прилегающих к предприятию населённых пунктов от текущих выбросов РН в атмосферу не превышает:

- 1,2 % от ПД для населения на внешней границе ПП (СЗЗ) предприятия;
- 0,46 % от ПД для населения в пос. Новогорный;
- 0,30 % от ПД для населения пос. Метлино, пос. № 2, пос. Сарыкульмяк, пос. Худайбердинск, пос. Башакуль;
- 0,20 % от ПД для населения г. Озёрска, пос. Большой Куяш, пос. Аргаяш;
- 0,10 % от ПД для населения г. Кыштыма и г. Касли.

2. Выбросы РВ из всех низких источников заводов ФГУП "ПО "Маяк" (даже при условии постоянного пребывания персонала в "критической точке") не создают дозовых нагрузок, превышающих ПД для персонала.

3. Дозовое воздействие на население от текущих выбросов РН в атмосферу из низких источников ЦЗЛ (территориально расположенной на локальной ПП в центральной части г. Озёрска), не превышает $1 \cdot 10^{-7}$ % от ПД для населения.

ВЫВОДЫ

1. Приведена краткая характеристика действующей на ФГУП "ПО "Маяк" системы газоаэрозольной очистки и системы контроля выбросов радиоактивных веществ в атмосферу по результатам инвентаризации (2018 г.) всех организованных источников выброса (труб) предприятия.

2. Приведены результаты расчёта нормативов предельно допустимых выбросов радио-

активных веществ в атмосферу, и оценены максимально возможные значения эффективной дозы облучения персонала и населения от текущих регламентных выбросов. Расчёты выполнены при использовании ряда консервативных (завышающих конечный результат) предположений для районов с максимальной приземной концентрацией, при наихудших метеорологических параметрах атмосферы.

3. Показано, что даже при всех консервативных предположениях, максимальная эффективная доза облучения населения от выбросов пренебрежимо мала и не превышает ~ 5 мкЗв/год (0,5 % от ПД для населения).

4. Показано, что в 2021 г. выбросы всех радионуклидов в атмосферу были на уровне предыдущих лет, существенно ниже установленных значений допустимых выбросов, и практически не влияли на радиационную обстановку в районе расположения предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Результаты инвентаризации источников выбросов радиоактивных веществ в атмосферу на ФГУП "ПО "Маяк" за 2017 год: Отчёт / ФГУП "ПО "Маяк"; Исп. Д.А. Берегич, К.Ю. Мокров. – Озёрск, 2018. – 101 с.
2. Методика разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. Утв. приказом Ростехнадзора от 07.11.2012 № 639. Зарег. в Минюсте РФ 18.01.2013 № 26595. Вступил в силу 12.04.2013. Официальный текст: по сост. на 01.06.2019. – М-во юстиции России, 2019.
3. Обоснование нормативов предельно допустимых выбросов радионуклидов в атмосферный воздух из источников ФГУП "ПО "Маяк" на период с 01.01.2020 по 31.12.2026. (Проект нормативов), Пояснительная записка, Исп. Д.А. Берегич, И.И. Тепляков, К.Ю. Мокров. – Озёрск, 2019. – 101 с.

УДК 621.039.553.5

© 2022

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВОДОЁМОВ ФГУП "ПО "МАЯК" В 2021 ГОДУ

*Ю.Г. Мокров, А.А. Посохова, К.Ю. Мокров
Россия, г. Озёрск, ФГУП "ПО "Маяк"*

Рассмотрены результаты гидрологического контроля состояния поверхностных водоёмов-хранилищ жидких радиоактивных отходов (ПВХЖРО) федерального государственного унитарного предприятия "Производственное объединение "Маяк" (ФГУП "ПО "Маяк") в условиях низкой водности 2016–2021 гг. Показано, что в 2021 г. уровни воды практически во всех ПВХЖРО существенно (на 0,4–0,5 м) понизились, и, в ряде случаев, для поддержания регламентных уровней воды потребовалась их подпитка. Проанализированы данные о радионуклидном и химическом составе воды ПВХЖРО за несколько последних лет. Показано, что в 2021 г. содержание загрязняющих веществ во всех водоёмах оставалось стабильным, не выявлено опасных тенденций и трендов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЖИДКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, ТЕЧЕНСКИЙ КАСКАД ВОДОЁМОВ, ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДОЁМЫ-ХРАНИЛИЩА ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, УРОВЕНЬ ВОДЫ

ПВХЖРО ФГУП "ПО "Маяк" расположены на территории промышленной площадки (ПП) предприятия и используются в технологических целях для обеспечения нужд обороны и федеральных энергетических систем:

- водоёмы В-2 и В-6 для оборотного водоснабжения ФГУП "ПО "Маяк";
- водоём В-17 (Старое болото) и водоёмы Теченского каскада водоёмов (ТКВ) для длительного хранения жидких технологических и нетехнологических низкоактивных отходов (НАО).

Водоём В-9 (Карачай) после закрытия акватории в 2015 г. является поверхностным хранилищем жидких среднеактивных отходов (САО).

В настоящее время водоёмы В-2, В-6, В-9, В-17 и ТКВ (В-3, В-4, В-10, В-11) по итогам межведомственного совещания о деятельности ФГУП "ПО "Маяк", проведённого в 2010 г., признаны объектами использования атомной энергии (ОИАЭ) – поверхностными водоёмами-хранилищами ЖРО – и оснащены инженерно-техническими сооружениями для ограничения поступления радионуклидов (РН) в окружающую среду. В их отношении реализуются меро-

приятия по повышению уровня радиационной безопасности в рамках федеральной целевой программы "Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008–2015 годы" (ФЦП "ЯРБ") [1] и государственных контрактов.

В 2014 г., в соответствии с требованиями федерального законодательства [2–3], проведена первичная регистрация РАО, по результатам которой ПВХЖРО присвоен статус "пункты размещения особых РАО". Безопасная эксплуатация ПВХЖРО регулируется Федеральными нормами и правилами [4] и руководством [5].

Наблюдения за состоянием ПВХЖРО производятся в соответствии с программой [6]. В 2021 г. все предусмотренные программой [6] работы по контролю поверхностных водоёмов были выполнены в полном объёме.

В работе приведено обобщение результатов контроля состояния водоёмов за 2021 г. в сравнении с аналогичными результатами за предыдущие годы.

ВОДОЁМ В-9 (КАРАЧАЙ)

В рамках ФЦП "ЯРБ" [1], в соответствии с проектом "Консервация водоёма В-9 (озеро

Карачай), третья очередь" (далее – "Проект"), в 2015 г. были завершены работы по закрытию акватории водоёма В-9. В пакете документации по Проекту содержалось требование о необходимости подпитки водоёма В-9 водой (после полного закрытия его акватории), что было обусловлено необходимостью поддержания заданного температурного режима в его закрытой части с целью гарантированного предотвращения газовыделения при термическом разложении сухого осадка РАО и исключения любых взрывных и пожарных ситуаций, а также для предотвращения ускоренной деградации железобетонных конструкций массива засыпки. Для выполнения этого требования предусматривалось, в том числе: создание сбросной линии для подпитки водоёма водой с целью поддержания регламентированного уровня воды под массивом засыпки; создание участка повышенной пористости в блочно-скальном массиве засыпки акватории водоёма от точки сброса ЖРО в водоём до участка фильтрационной разгрузки; обоснование количества пустотелых элементов для локализации высокоактивных илов водоёма и снижение тем самым радиационной нагрузки на персонал [7]. В 2015 г. радиоэкологическая безопасность подпитки водоёма была детально и всесторонне обоснована специалистами предприятия на основе многолетнего опыта эксплуатации и мониторинга водоёма В-9 на протяжении всего жизненного цикла, в том числе на основе результатов прогнозного математического моделирования и оценки экологической безопасности, выполненной экспертами Центра ГМСН и РР (ФГБУ "Гидроспецгеология"). Для обеспечения радиационной безопасности закрытой акватории водоёма В-9 – путём исключения возможности осушения и последующего разогрева илов – в проекте предусмотрена организация контроля и поддержания заданного уровня воды в массиве засыпки с использованием четырёх специальных "скважин" – пьезометров. Схема расположения пьезометров на закрытой акватории водоёма В-9 показана на рис. 1.

Периодичность измерений уровня воды в пьезометрах (ежемесячно) и отбора проб воды из пьезометров (два раза в год), а также контролируемые показатели качества воды определены в программе контроля [6]. На рис. 2

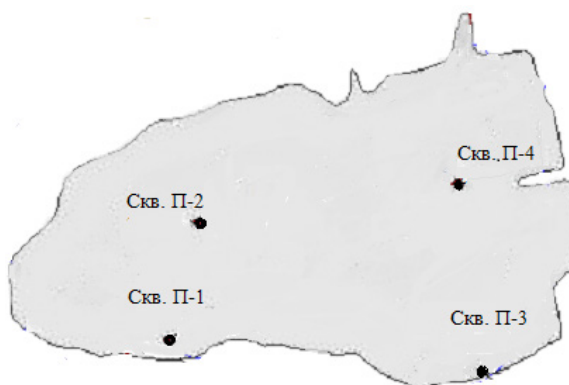


Рис. 1. Схема расположения пьезометров на закрытой акватории водоёма В-9

представлены данные об изменениях уровня воды в пьезометрах за период 2016–2021 гг.

Анализ данных рис. 2 позволяет сделать следующие выводы:

- за весь период наблюдений уровень воды в массиве засыпки (пьезометрах) всегда находился в установленных пределах, а именно, выше минимального проектного уровня ($ПУ_{\min} = 250,5 \text{ м}$) и ниже максимального уровня ($ПУ_{\max} = 254,0 \text{ м}$);
- изменения уровней воды во всех пьезометрах, как правило, носят "синхронный" характер (отличаются не более, чем на 0,1–0,2 м), что свидетельствует о хорошей гидравлической связи между различными участками акватории водоёма В-9, включая участок фильтрационной разгрузки;

- причины расхождения значений уровней воды в октябре–декабре 2021 г., по-видимому, связаны с режимом подпитки водоёма и будут детально проанализированы позже.

Пробы воды из пьезометров обычно отбираются весной (в марте–апреле) и в конце летнего сезона (в августе–сентябре) [6]. В табл. 1 приведены результаты усреднённых за год значений объёмной активности (ОА) воды В-9 за 2021 г. в сравнении с соответствующими результатами контроля за 2020 г.

Анализ представленных в табл. 1 данных показывает, что значения ОА проб воды из пьезометров водоёма В-9 характеризуются относительной стабильностью как в пределах закрытой акватории, так и во времени. Наблюдаемый "разброс" значений ОА, как правило, не превы-

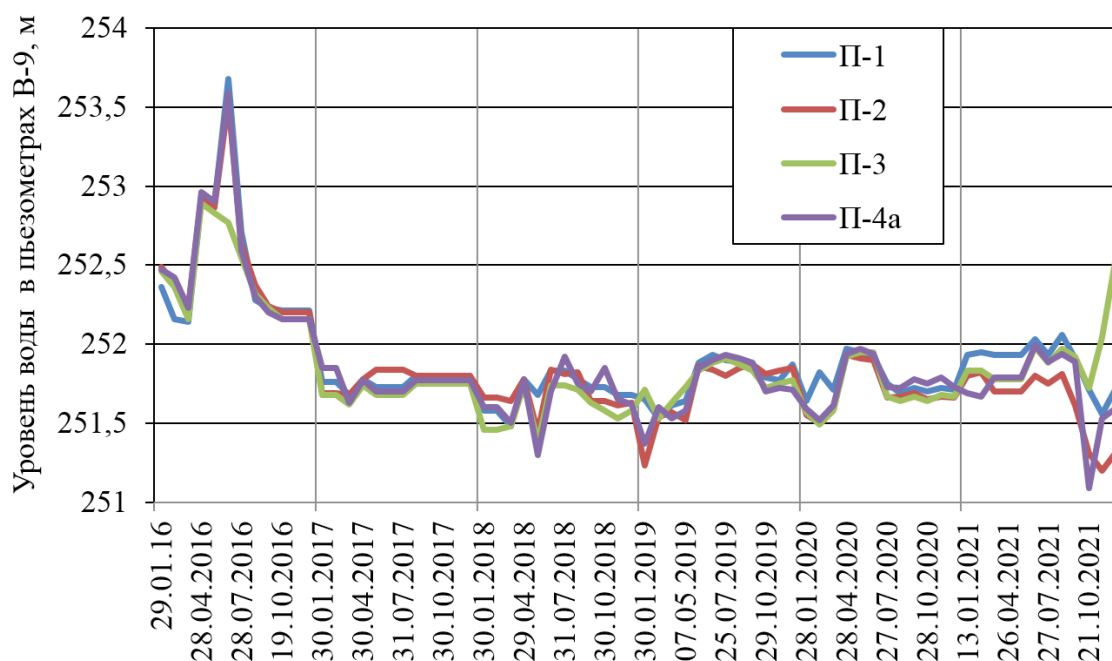


Рис. 2. Изменение уровня воды в пьезометрах водоёма В-9 за 2016–2021 гг.

Таблица 1

 Средние за год значения ОА воды в водоёме В-9 за 2020 и 2021 гг., Бк/дм³

| Нуклид | Пьезометр-1 | | Пьезометр-2 | | Пьезометр-3 | | Пьезометр-4 | |
|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 2020 | 2021 | 2020 | 2021 | 2020 | 2021 | 2020 | 2021 |
| СААИН | $3,4 \cdot 10^3$ | $4,4 \cdot 10^3$ | $4,7 \cdot 10^3$ | $1,8 \cdot 10^4$ | $5,0 \cdot 10^3$ | $2,8 \cdot 10^3$ | $1,3 \cdot 10^3$ | $6,7 \cdot 10^3$ |
| $^{241}\text{Am} + ^{238}\text{Pu}$ | $2,1 \cdot 10^3$ | $2,6 \cdot 10^3$ | $7,0 \cdot 10^2$ | $1,2 \cdot 10^4$ | $4,2 \cdot 10^3$ | $1,9 \cdot 10^3$ | $1,0 \cdot 10^3$ | $4,3 \cdot 10^3$ |
| $^{239,240}\text{Pu}$ | <500 | <500 | <500 | $2,3 \cdot 10^3$ | <500 | <500 | <500 | <500 |
| $^{244,242}\text{Cm}$ | <500 | $8,6 \cdot 10^2$ | <500 | $1,4 \cdot 10^3$ | $5,8 \cdot 10^2$ | <500 | $6,0 \cdot 10^2$ | $1,8 \cdot 10^3$ |
| САБИН | $6,1 \cdot 10^6$ | $5,4 \cdot 10^6$ | $1,3 \cdot 10^7$ | $1,4 \cdot 10^7$ | $2,4 \cdot 10^6$ | $2,1 \cdot 10^6$ | $3,7 \cdot 10^6$ | $2,0 \cdot 10^6$ |
| ^{90}Sr | $1,7 \cdot 10^6$ | $2,1 \cdot 10^6$ | $3,8 \cdot 10^6$ | $6,1 \cdot 10^6$ | $6,5 \cdot 10^5$ | $7,8 \cdot 10^5$ | $1,2 \cdot 10^6$ | $7,2 \cdot 10^5$ |
| ^{137}Cs | $5,7 \cdot 10^5$ | $6,1 \cdot 10^5$ | $4,8 \cdot 10^5$ | $3,9 \cdot 10^5$ | $5,4 \cdot 10^4$ | $1,8 \cdot 10^5$ | $8,6 \cdot 10^4$ | $1,7 \cdot 10^5$ |
| Тритий | $8,6 \cdot 10^4$ | $5,9 \cdot 10^4$ | $1,9 \cdot 10^5$ | $1,9 \cdot 10^5$ | $1,8 \cdot 10^4$ | $1,0 \cdot 10^4$ | $7,4 \cdot 10^4$ | $2,6 \cdot 10^4$ |

шает 2–3 раз от среднего по акватории значения и обусловлен погодными условиями и режимом техногенной подпитки.

В 2021 г. для разных пьезометров (в водной среде В-9) значения ОА для суммарной активности α -излучающих нуклидов (СААИН)

изменялись от $2,8 \cdot 10^3$ Бк/дм³ (Пьезометр-3) до $1,8 \cdot 10^4$ Бк/дм³ (Пьезометр-2) при среднем значении $8,0 \cdot 10^3$ Бк/дм³, а значения ОА для суммарной активности β -излучающих нуклидов (САБИН) – от $2,0 \cdot 10^6$ до $1,40 \cdot 10^7$ Бк/дм³ при среднем значении $5,6 \cdot 10^6$ Бк/дм³.

В табл. 2 приведены значения концентраций химических веществ в водной среде В-9 в 2020–2021 гг. Анализ представленных в табл. 1 и 2 данных показывает, что для пьезометра-2, как правило, характерно более высокое содержание радионуклидов и солей, что, по-видимому, обусловлено свойствами массива засыпки и удалённым расположением от линии подпитки водой.

ВОДОЁМ В-17 (СТАРОЕ БОЛОТО)

Результаты измерений ОА РН и химического состава в пробах воды водоёма В-17, отобранных в 2021 г., в сравнении с результатами контроля за 2019 и 2020 гг. приведены в табл. 3 и 4. Анализ данных табл. 3 и 4 показыва-

ет, что в 2019–2021 гг. значения концентрации химических веществ и ОА большинства РН в воде водоёма В-17 изменялись разнонаправленно и оставались на одном уровне. Отсутствие чётко выраженных трендов по изменению концентраций химических веществ и значений ОА в воде водоёма В-17 позволяет характеризовать радиохимическое загрязнение водоёма как стабильное.

Изменение уровня воды в водоёме В-17 за 2019–2021 гг. показано на рис. 3. Представленные на рис. 3 данные позволяют сделать выводы:

– максимальные значения уровня воды, как правило, наблюдаются весной (март–апрель) в период схода ледяного покрова и были всегда ниже максимального проектного

Таблица 2

Химический состав воды водоёма В-9 за 2020 и 2021 гг.

| Показатель, единица измерений | Пьезометр-1 | | Пьезометр-2 | | Пьезометр-3 | | Пьезометр-4 | |
|-----------------------------------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|
| | 2020 | 2021 | 2020 | 2021 | 2020 | 2021 | 2020 | 2021 |
| Уран, мг/дм ³ | 6,0 | 4,8 | 24,0 | 39,0 | 4,6 | 0,58 | 0,39 | 0,88 |
| Жёсткость, ммоль/дм ³ | 8,0 | 5,0 | 10,0 | 6,0 | 6,0 | 5,0 | 9,0 | 6,0 |
| Нитрат-ион, мг/дм ³ | 730 | 420 | 770 | 58 | 109 | 78 | 169 | 239 |
| Сульфат-ион, мг/дм ³ | 92 | 58 | 147 | 135 | 15,3 | 15,2 | 32,4 | 26 |
| Сухой остаток, мг/дм ³ | 2210 | 1792 | 4700 | 4488 | 470 | 496 | 280 | 464 |

Таблица 3

Значения ОА РН в воде В-17 за 2019–2021 гг., Бк/дм³

| Нуклид | 2019 г. | | 2020 г. | | 2021 г. | |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 30.05 | 13.08 | 07.07 | 05.11 | 11.05 | 05.10 |
| ²⁴¹ Am+ ²³⁸ Pu | 193 | 30 | 90 | 170 | 136 | 70 |
| ^{239,240} Pu | 76 | 70 | 38 | – | <40 | <50 |
| ²⁴⁴ Cm | – | – | – | – | <40 | <50 |
| ²³⁴ U+ ²³⁷ Np | 48 | 40 | 35 | 29 | 40 | <50 |
| ^{235,238} U | 20 | 40 | 36 | – | <40 | <50 |
| ⁹⁰ Sr | 7,8·10 ⁴ | 8,4·10 ⁴ | 1,16·10 ⁵ | 1,11·10 ⁵ | 8,20·10 ⁴ | 1,37·10 ⁵ |
| ¹³⁷ Cs | 8,9·10 ³ | 8,9·10 ³ | 1,11·10 ⁴ | 1,97·10 ⁴ | 1,32·10 ⁴ | 1,25·10 ⁴ |
| Тритий | 2,1·10 ⁶ | 1,8·10 ⁶ | 3,20·10 ⁶ | 2,25·10 ⁶ | 3,40·10 ⁶ | 6,40·10 ⁴ |

Таблица 4

Химический состав воды водоёма В-17 за 2019–2021 гг.

| Показатель, единица измерений | 2019 год | | 2020 год | | 2021 год | |
|---|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| | 30.05 | 13.08 | 07.07 | 05.11 | 11.05 | 05.10 |
| рН | 6,60 | 7,20 | 7,18 | 7,23 | 6,84 | 7,99 |
| Уран, мг/дм ³ | 1,35 | 1,54 | 1,8 | 0,69 | 0,82 | 0,72 |
| Натрий, мг/дм ³ | 672 | 485 | 746 | 338 | 439 | 576 |
| Кальций, мг/ дм ³ | 300 | 300 | 290 | 140 | 175 | 260 |
| Жёсткость, ммоль/дм ³ | 21,0 | 27,0 | 21,7 | 23,0 | 18,0 | 18,7 |
| Нитрат-ион, мг/ дм ³ | 2430 | 2380 | 2770 | 1730 | 1480 | 2290 |
| Нитрит-ион, мг/дм ³ | 17,7 | 35 | 34 | 33 | 27 | 36 |
| Бикарбонат-ион, мг/дм ³ | 476 | 366 | 366 | 366 | 122 | 183 |
| Сульфат-ион, мг/дм ³ | 79 | 84 | 72 | 89 | 64 | 77 |
| Хлорид-ион, мг/дм ³ | 41 | 41 | 43 | 43 | 36 | 50 |
| Окисляемость перманганатная, мг О/дм ³ | 10,2 | 14,3 | 18 | 16,5 | – | – |
| Окисляемость бихроматная, мг О/дм ³ | 91 | 177 | 73 | 163 | 112 | 96 |
| Сухой остаток, мг/дм ³ | 3460 | 3780 | 8500 | 3900 | 1128 | 3690 |

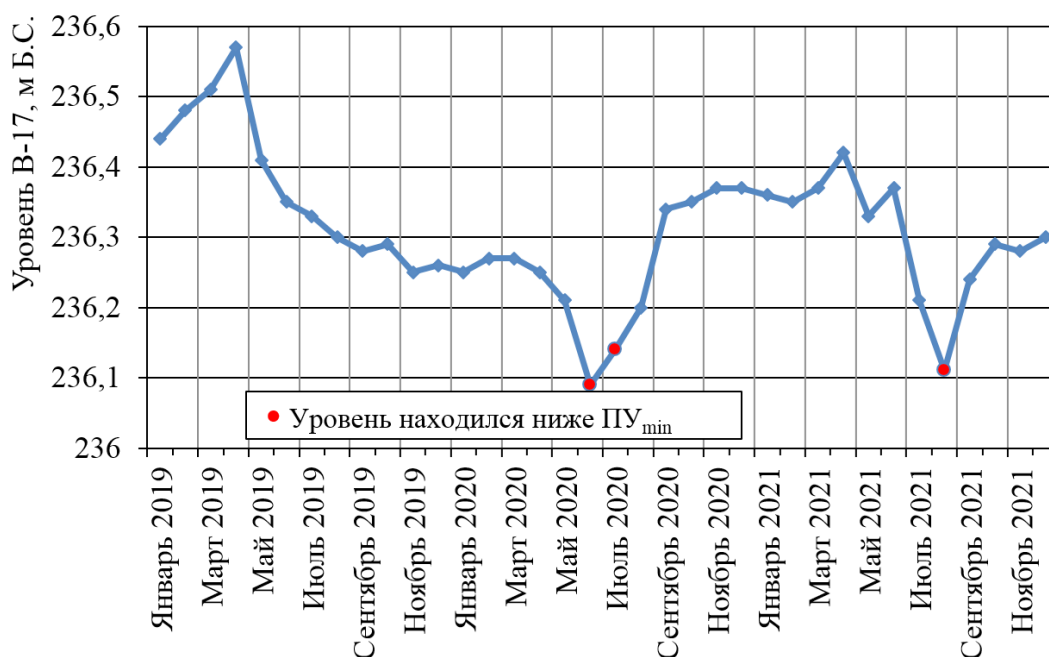


Рис. 3. Изменение уровня воды в водоёме В-17 за 2019–2021 гг.

уровня ($ПУ_{\max} = 237,06$ м);

– минимальные значения уровня воды регистрируются летом (июль–август) в период максимальных испарений и в этот период могли быть незначительно ниже ($ПУ_{\min} = 236,16$ м);

– для нормализации уровня воды в водоёме В-17 в 2020–2021 гг. использовалась подпитка водоёма технической водой.

СОСТОЯНИЕ ТЕЧЕНСКОГО КАСКАДА ВОДОЁМОВ

Среднегодовые (четыре измерения за год) значения ОА РН в воде основных (по объёму воды и накопленной активности) водоёмов В-10 и В-11 за 2021 г. приведены в табл. 5 в сравнении с аналогичными результатами контроля за 2019 и 2020 гг.

Анализ данных табл. 5 показывает, что в пределах экспериментальной погрешности значения ОА каждого РН в воде водоёмов В-10 и В-11 за 2019–2021 гг. оставались постоянными.

В табл. 6 приведены усреднённые за 2021 г. результаты измерений характеристик химического загрязнения воды водоёмов ТКВ (12 измерений за год).

На рис. 4 и 5 приведены результаты измерений уровней воды в водоёмах В-10 и В-11 за 2019–2021 гг.

Как видно из рис. 4 и 5, в 2021 г. уровень воды в водоёмах В-10 и В-11 находился значительно ниже $ПУ_{\max} = 219,92$ м и $217,32$ м соответственно. Минимальный подпорный уровень для водоёма В-11 не установлен. В летний период 2021 г. на всех водоёмах ТКВ

Таблица 5

Среднегодовые значения ОА РН в воде водоёмов В-10 и В-11 в 2019–2021 гг., Бк/дм³

| Водоём | Год | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co | Тритий (НТО) |
|--------|------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| В-10 | 2019 | $1,86 \cdot 10^3$ | 3,7 | <3,0 | $2,18 \cdot 10^3$ |
| | 2020 | $1,95 \cdot 10^3$ | 29,8 | 3,7 | $2,45 \cdot 10^3$ |
| | 2021 | $1,93 \cdot 10^3$ | 14,8 | <4,2 | $2,01 \cdot 10^3$ |
| В-11 | 2019 | $0,80 \cdot 10^3$ | <3,0 | <3,0 | $0,21 \cdot 10^3$ |
| | 2020 | $0,86 \cdot 10^3$ | <2,95 | <1,5 | $0,20 \cdot 10^3$ |
| | 2021 | $0,95 \cdot 10^3$ | <2,87 | <2,7 | $0,19 \cdot 10^3$ |

наблюдалось существенное снижение уровня воды (до 0,4–0,5 м), что больше, чем за аналогичные периоды 2019 и 2020 гг. За последние три года, для водоёма В-11 отчётливо прослеживается общий тренд на понижение уровня воды.

ВОДОЁМ В-2 (ОЗ. КЫЗЫЛ-ТАШ)

В соответствии с программой [6] ОА РН и химический состав воды водоёма В-2 определяются ежемесячно. Среднегодовые значения ОА РН в воде водоёма В-2 приведены в табл. 7. Анализ данных табл. 7 показывает, что вода водоёма В-2 может быть отнесена к ЖРО только для ОА ⁹⁰Sr.

Для различных РН изменения во времени значений ОА в воде водоёма В-2 характеризуются стабильностью или тенденцией к снижению. На рис. 6 и 7 для примера приведены данные об изменении ОА ¹³⁷Cs и САБИН в воде водоёма В-2 за 2015–2019 гг.

Таблица 6

Химический состав воды водоёмов В-3, В-4, В-10 и В-11 в 2021 г.

| Показатель, единица измерений | В-3 | В-4 | В-10 | В-11 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| рН | 8,22 | 8,32 | 8,21 | 8,23 |
| Щёлочность, ммоль/дм ³ | 4,55 | 5,02 | 4,7 | 4,1 |
| Жёсткость общая, ммоль/дм ³ | 4,39 | 4,77 | 5,9 | 8,6 |
| Кальций, мг/дм ³ | 32,8 | 36,0 | 44,8 | 59 |
| Магний, мг/дм ³ | 33,3 | 35,9 | 44 | 68 |
| Натрий, мг/дм ³ | 53,6 | 61,3 | 104 | 142 |
| Хлорид-ион, мг/дм ³ | 59,4 | 62,8 | 77 | 95 |
| Сульфат-ион, мг/дм ³ | 40,7 | 62,7 | 198 | 463 |
| Нитрат-ион, мг/дм ³ | 1,35 | 0,91 | 2,70 | 0,875 |
| Нитрит-ион, мг/дм ³ | 0,033 | 0,022 | 0,066 | 0,024 |
| Окисляемость бихроматная, мг О/дм ³ | 53,3 | 68 | 59 | 55 |
| Сухой остаток, мг/дм ³ | 435 | 484 | 698 | 1049 |
| Минеральный остаток, мг/дм ³ | 289 | 329 | 546 | 813 |

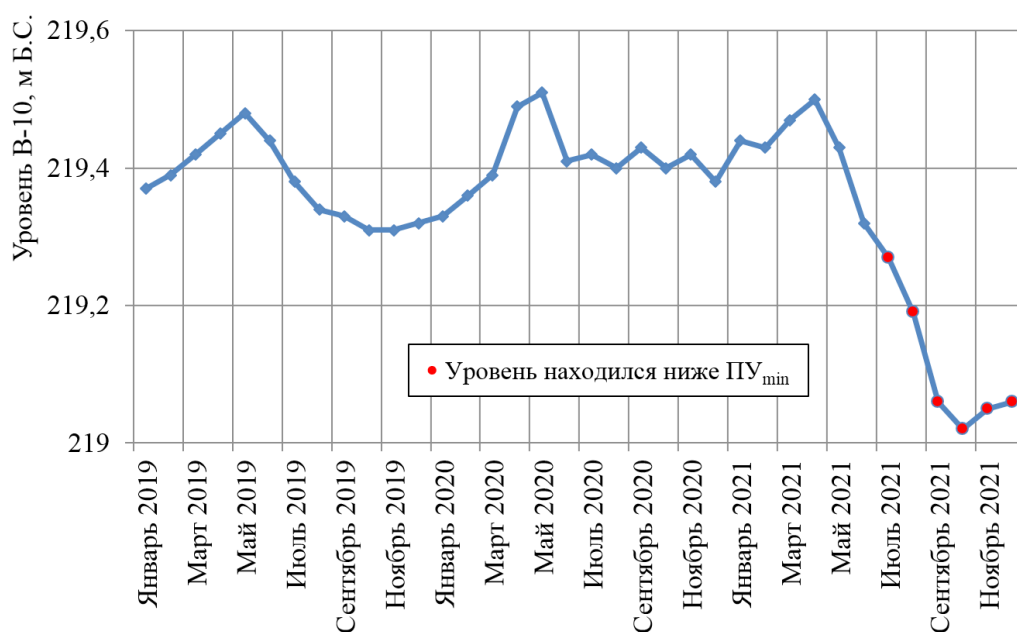


Рис. 4. Изменение уровня воды в водоёме В-10 за 2019–2021 гг.

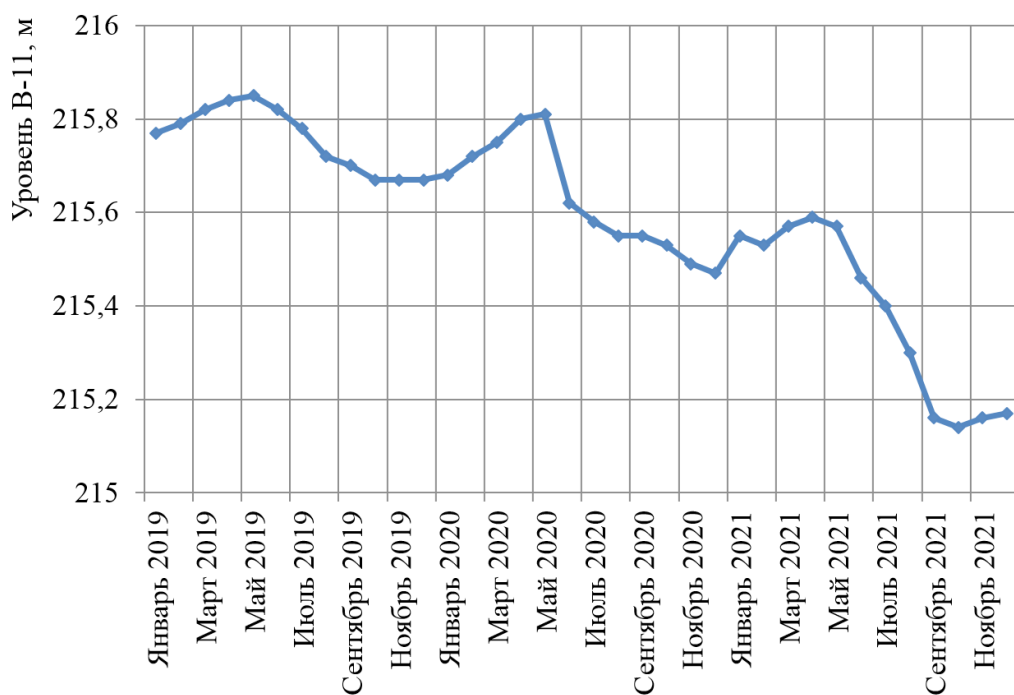


Рис. 5. Изменение уровня воды в водоёме В-11 за 2019–2021 гг.

Таблица 7

Среднегодовые значения ОА РН
в воде В-2 в 2021 г., Бк/дм³

| Нуклид | ОА, Бк/дм ³ | Нижняя граница активности ЖРО, Бк/дм ³ |
|--------------------------------------|---------------------------|---|
| ²⁴¹ Am+ ²³⁸ Pu | 0,44 | 129 |
| ^{239,240} Pu | 0,45 | 110 |
| ²³⁴ U+ ²³⁷ Np | 0,20 | 410 |
| ^{235,238} U | 0,20 | 590 |
| ⁹⁰ Sr | 2,9·10 ³ | 490 |
| ¹³⁷ Cs | 63,0 | 1,10·10 ³ |
| Тритий | 1,9·10 ⁴ | 1,0·10 ⁶ |

Среднегодовой химический состав воды водоёма В-2 в сравнении с аналогичными данными за 2019 и 2020 гг. приведён в табл. 8.

В 2021 г. концентрация большинства контролируемых химических веществ оставалась на уровне предыдущих лет (в пределах погрешности определения) и фиксировалась ниже ПДК, принятых для водоёмов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового использования. Результаты измерений уровня воды водоёма В-2 в 2021 г. приведены на рис. 8.

Как видно из рис. 8, изменение во времени уровня воды водоёма В-2 имеет "синусоидальный" характер. Как и для всех водоёмов (рис. 4 и 5), максимальные значения уровня

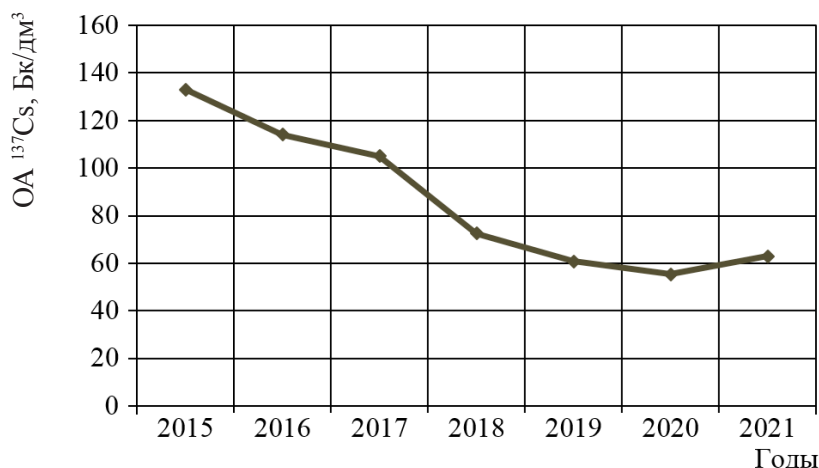


Рис. 6. Изменение ОА ¹³⁷Cs в воде водоёма В-2 за 2015–2021 гг.

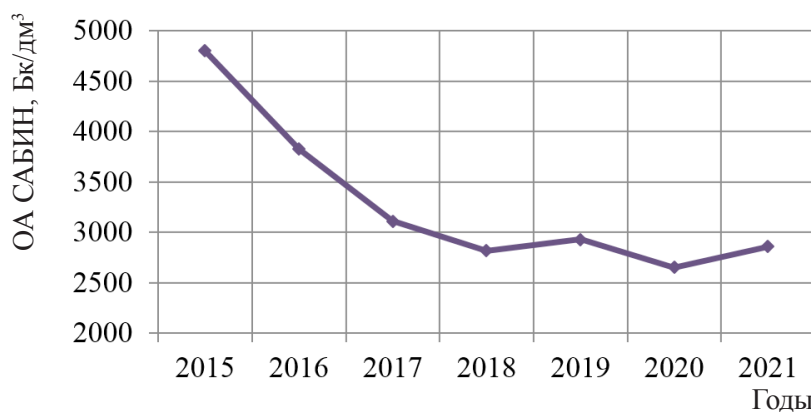


Рис. 7. Изменение ОА САБИН в воде водоёма В-2 за 2015–2021 гг.

Таблица 8

Среднегодовой химический состав воды водоёма В-2 за 2019–2021 гг.

| Показатель, единица измерений | Состав воды по годам | | | ПДК |
|---|----------------------|-------|-------|------|
| | 2019 | 2020 | 2021 | |
| рН | 8,63 | 8,32 | 8,33 | – |
| Щёлочность, ммоль/дм ³ | 3,62 | 3,77 | 4,1 | – |
| Жёсткость общая, ммоль/дм ³ | 4,48 | 4,83 | 4,77 | – |
| Кальций, мг/дм ³ | 28,9 | 28,2 | 29,7 | – |
| Магний, мг/дм ³ | 36,8 | 40,9 | 39,6 | 50 |
| Натрий, мг/дм ³ | 66,5 | 63,4 | 65,1 | 200 |
| Хлорид-ион, мг/дм ³ | 74,6 | 75,6 | 82,0 | 350 |
| Сульфат-ион, мг/дм ³ | 86,9 | 77,8 | 86,9 | 500 |
| Нитрат-ион, мг/дм ³ | 1,95 | 2,28 | 4,49 | 45 |
| Нитрит-ион, мг/дм ³ | 0,07 | 0,35 | 0,33 | 3,0 |
| Сухой остаток, мг/дм ³ | 516 | 508 | 510 | 1000 |
| Минеральный остаток, мг/дм ³ | 369 | 351 | 347 | – |
| АПВ, мг/дм ³ | 0,045 | 0,039 | 0,056 | 0,5 |

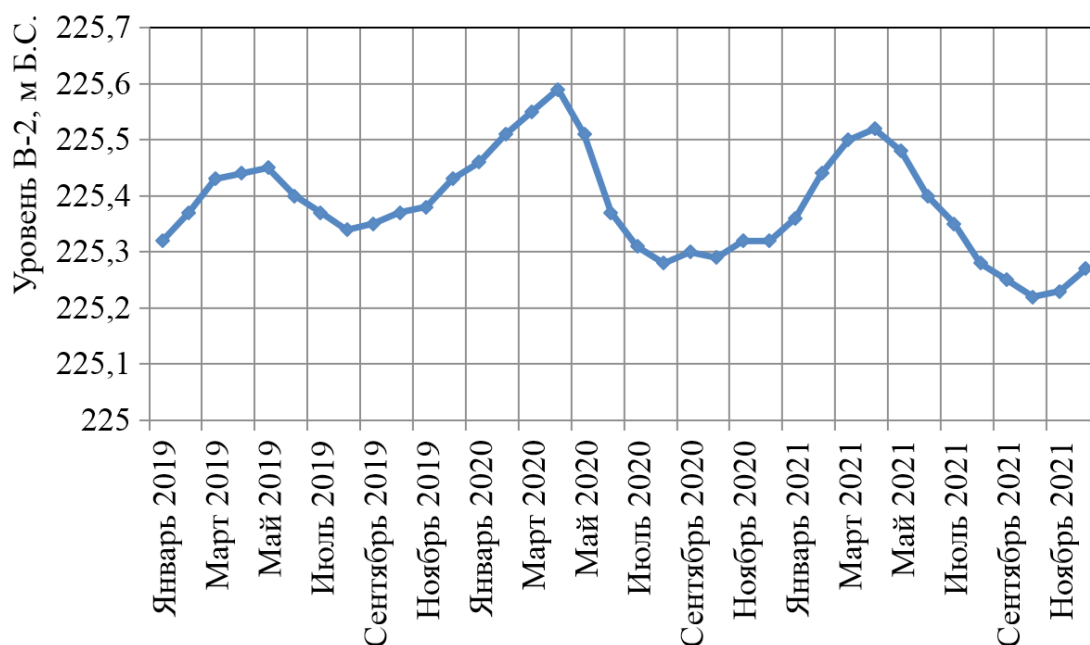


Рис. 8. Изменение уровня воды в водоёме В-2 за 2019–2021 гг.

Таблица 9

Среднегодовой химический состав воды водоёма В-6 за 2019–2021 гг.

| Показатель, единица измерений | Годы | | |
|--|--------|--------|--------|
| | 2019 | 2020 | 2021 |
| рН | 8,73 | 8,56 | 9,03 |
| Уран, мг/дм ³ | 0,0028 | 0,0030 | 0,0048 |
| Нитрат-ион, мг/дм ³ | 1,97 | 1,69 | 1,65 |
| Нитрит-ион, мг/дм ³ | 0,065 | 0,39 | 0,070 |
| Хлорид-ион, мг/дм ³ | 36,0 | 38,9 | 42,8 |
| Сульфат-ион, мг/дм ³ | 33,4 | 33,5 | 35,6 |
| Взвешенные вещества, мг/дм ³ | 19,8 | 12,2 | 14,0 |
| Щёлочность, ммоль/ дм ³ | 7,25 | 7,59 | 7,65 |
| Натрий, мг/дм ³ | 163 | 146 | 123 |
| Кальций, мг/дм ³ | 14,9 | 14,4 | 23,1 |
| Магний, мг/дм ³ | 16,8 | 18,9 | 16,5 |
| Жёсткость общая, ммоль/дм ³ | 2,13 | 2,27 | 2,35 |
| Окисляемость бихроматная, мг О/дм ³ | 66,5 | 62 | 80 |
| Сухой остаток, мг/дм ³ | 530 | 489 | 540 |
| Минеральный остаток, мг/дм ³ | 391 | 359 | 379 |

воды, как правило, наблюдаются весной (март–апрель) – в период схода ледяного покрова, – а минимальные значения уровня воды регистрируются летом (июль–август) – в период максимальных испарений. В 2021 г. подпитка водоёма В-2 водой из оз. Иртяш или других источников, не проводилась.

ВОДОЁМ В-6 (ОЗ. ТАТЫШ)

Отбор проб воды из водоёма В-6 проводится ежеквартально [6]. Результаты определения химического состава воды водоёма В-6 за 2019–2021 гг. приведены в табл. 9, а изменение среднегодовой ОА СААИН и ⁹⁰Sr в воде водоёма В-6 за 2015–2021 гг. показаны на рис. 9.

Как видно из рис. 9, значения ОА СААИН и ⁹⁰Sr в пределах погрешности определения оставались на уровне предыдущих лет или незначительно снижались.

Изменение уровня воды в водоёме В-6 за период с 2019 по 2021 гг. показано на рис. 10. Представленные данные позволяют сделать следующие выводы:

- за период с апреля по октябрь 2021 г. уровень воды понизился на 0,42 м;
- в декабре 2021 г. уровень воды В-6 составлял 255,13 м, что на 0,27 м ниже, чем в декабре 2020 г.;
- в 2021 г. уровень воды изменялся в установленных регламентом отметках.

В 2021 г. сброс воды из водосборной канавы в р. Мишеляк не проводился.

ВЫВОДЫ

1. Контроль за гидрологическим и радиохимическим состоянием ПВХЖРО в 2021 г. осуществлялся в соответствии с действующей программой контроля.

2. В связи с аномально низкой водно-

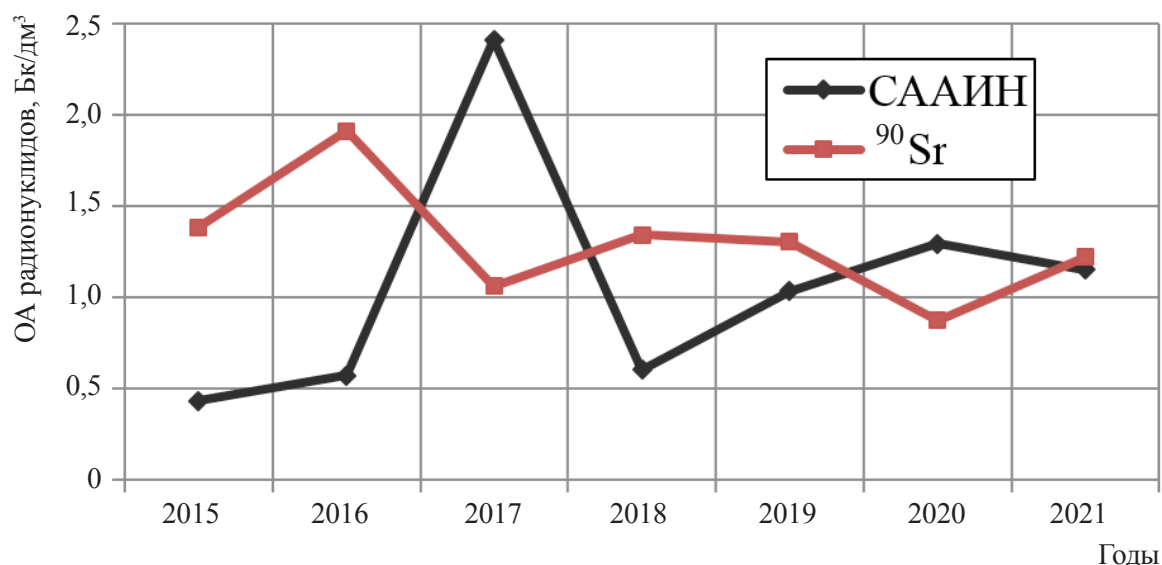


Рис. 9. Изменение ОА РН в воде водоёма В-6 за 2015–2021 гг.

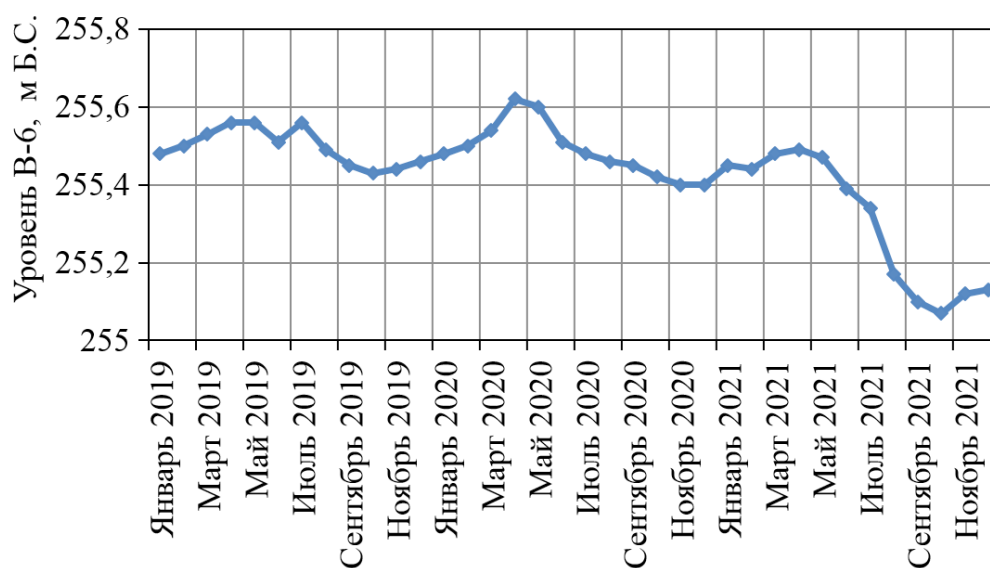


Рис. 10. Изменение уровня воды в водоёме В-6 за 2019–2021 гг.

стью 2021 г. в летний период уровни воды в ПВХЖРО снизились на 0,4–0,5 м. Для поддержания регламентных уровней воды в водоёмах В-9 и В-17 потребовалась их подпитка.

3. В течение последних 2–3 лет ОА РН и

химический состав воды ПВХЖРО остаются стабильными, а для некоторых РН наблюдается тенденция к снижению ОА.

4. Не выявлено опасных для эксплуатации ПВХЖРО тенденций и трендов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года: Федеральная целевая программа. – 2019.
2. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон № 190-ФЗ. – М.: Минюст России, 2019.
3. О критериях отнесения твёрдых, жидких и газообразных отходов к РАО, критериях отнесения РАО к особым РАО и к удаляемым РАО и критериях классификации удаляемых РАО: Постановление Правительства РФ 19.10.2012 № 1069. – М.: Минюст России, 2017.
4. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения: ФНП-058-14. – М.: Ростехнадзор, 2014.
5. Санитарно-гигиенические требования по обеспечению безопасности при эксплуатации поверхностных водоёмов-хранилищ ЖРО ФГУП "ПО "Маяк": Р 2.6.1.092-2013. – М., 2013.
6. Программа радиационного и химического контроля в зоне влияния ФГУП "ПО "Маяк" на период 2021–2025 гг. (санитарно-защитная зона и зона наблюдения) / ФГУП "ПО "Маяк". – Озерск, 2020. – 67 с.
7. Мокров Ю.Г., Алексахин А.И. Мониторинг – основа обеспечения безопасности при выполнении работ по консервации водоёма Карачай // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 3(4). – С. 60–68.

УДК 574.24:57.043

© 2022

**АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА ЭКОСИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ВОДОЁМОВ ФГУП "ПО "МАЯК" НА ПРИМЕРЕ ВОДОЁМА В-4**

*Е.А. Пряхин¹, Н.И. Атаманюк¹, А.А. Перетыкин¹, М.В. Тюхай¹,
Н.И. Могильникова¹, Е.В. Стяжкина^{1,2}, Н.А. Обвинцева¹, С.С. Андреев¹,
А.Е. Алдибекова¹, Ю.Г. Мокров³, К.Ю. Мокров³, Г.А. Тряпицына^{1,2}*

*¹Россия, г. Челябинск, ФГБУН Уральский научно-практический центр
радиационной медицины ФМБА России*

*²Россия, г. Челябинск, ФГБОУ ВО Челябинский государственный
университет*

³Россия, г. Озёрск, ФГУП "ПО "Маяк"

Достижение приемлемого уровня антропогенного воздействия на экосистемы и биосферу является одной из важных проблем современности. Система радиационной защиты пресноводных экосистем на основе биоценологических эффектов к настоящему времени не разработана. На основе анализа выявленных в специальных промышленных водоёмах ПО "Маяк" дозозависимых эффектов на организменном, популяционном уровне и уровне сообществ предложена система биологического мониторинга. Эта система предполагает регулярную оценку и анализ состояния пресноводных биоценозов на основе определения содержания основных дозообразующих радионуклидов в абиотических и биотических компонентах экосистемы, расчёт мощностей доз для основных групп гидробионтов, анализ состояния биоценозов по показателям фитопланктона, зоопланктона, зообентоса, высших водных растений, ихтиофауны. Предложенная система дополняет производственный экологический мониторинг ПО "Маяк" и позволяет решать научные и практические задачи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТЕЧЕНСКИЙ КАСКАД ВОДОЁМОВ, ВОДОЁМ В-4, БИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ, БИОЦЕНОЗ, ФИТОПЛАНКТОН, ЗООПЛАНКТОН, ЗООБЕНТОС, ИХТИОФАУНА, ХРОНИЧЕСКОЕ РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Одной из важнейших задач современного рационального природопользования является определение закономерностей нормального функционирования природных экосистем и пределов их устойчивости к масштабному и долговременному антропогенному воздействию. Для решения этих задач необходимы оценка и прогноз состояния этих объектов, уровня их загрязнения и экологического неблагополучия, прогнозирование опасных явлений. Среди широкого спектра антропогенных факторов особое место занимает радиоактивное загрязнение окружающей среды. Оценка экологического риска хронического радиационного воздействия на пресноводные биоценозы является актуальной задачей.

Радиоактивно загрязнённые специальные промышленные водоёмы ФГУП "Производственное объединение "Маяк" (ПО "Маяк") являются уникальными водными объектами в биосфере, изучение которых открывает возможности оценки экологического риска хронического радиационного воздействия для пресноводных экосистем [1].

Изучение состояния биоценозов радиоактивно загрязнённых водоёмов ПО "Маяк" может быть использовано как для решения научной проблемы по радиационной защите окружающей среды, так и для решения практических задач, связанных с обеспечением радиационной безопасности населения и окружающей среды при осуществлении деятельности ПО "Маяк".

Что касается радиационной защиты окружающей среды, МКРЗ рекомендует использовать для этой цели референтные виды растений и животных (Reference Animals and Plants – RAPs) [2]. Согласно Публикации 108 МКРЗ, референтные животные и растения представляют собой модели, для которых описаны биологические особенности, которые могут быть использованы для расчёта накопления радионуклидов, расчёта доз и определения возможных биологических эффектов для этого типа живых организмов. Рассчитанные дозы и эффекты для референтных видов растений и животных являются основанием для принятия решений по защите окружающей среды.

Этот подход основан преимущественно на данных, полученных в лабораторных исследованиях при оценке влияния острого ионизирующего облучения на модельные объекты. Эта позиция критикуется, поскольку в рамках данного подхода невозможно учесть не прямые эффекты влияния хронического радиоактивного воздействия на экосистемы, так как в реальных природных условиях виды существуют в сложной системе межвидовых взаимодействий и подвергаются воздействию комплекса природных и антропогенных факторов [3, 4]. Для учёта всего комплекса экологических факторов необходимо применять экосистемный подход, где анализируемые критические показатели должны отражать состояние популяций, сообществ, экосистемы в целом.

С другой стороны, биологический мониторинг специальных промышленных водоёмов ПО "Маяк" необходим для решения ряда практических задач, связанных с обеспечением радиационной безопасности населения и окружающей среды при осуществлении деятельности предприятия атомной отрасли. Анализ гидробиологических показателей является частью режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши [5] и мониторинга экологического регресса пресноводных экосистем, который проводится подразделениями соответствующих министерств, осуществляющих природоохранную деятельность в районах повышенного риска антропогенного загрязнения [6]. Для ПО "Маяк" данные о состоянии биоценозов необходимы для составления документов об экологических изы-

сканиях при проектировании, строительстве и реконструкции производств на ПО "Маяк"; для подготовки материалов обоснования лицензии (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду) на деятельность в области использования атомной энергии; для обеспечения безопасной эксплуатации Теченского каскада водоёмов (ТКВ); для контроля качества воды водоёма-охладителя с точки зрения обеспечения надёжной эксплуатации гидротехнических систем охлаждения реакторов (контроль и прогноз перифитонных обрастаний).

Кроме того, остаются не до конца решёнными научно-практические задачи: оценка роли биологических процессов в образовании водного аэрозоля на водоёмах-хранилищах ЖРО и аэрозольного загрязнения атмосферы вблизи водоёмов [7]; проблема биологического выноса радионуклидов птицами и летучими мышами, которые используют радиоактивно загрязнённые водоёмы как кормовую базу [8].

ФГБУН УНПЦ РМ ФМБА России совместно с ЦЗЛ ФГУП "ПО "Маяк" с 2007 г. выполняет работы по изучению гидробиоценозов специальных промышленных водоёмов, в которых выявлены основные эффекты хронического радиационного воздействия в пресноводных биоценозах.

Цель настоящей работы – на основании выявленных радиационно индуцированных экологических эффектов разработать систему биологического мониторинга на примере водоёма В-4 ПО "Маяк".

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследований. Общая характеристика водоёма В-4. Промышленный водоём В-4 (бывший Метлинский пруд) располагается в Челябинской области, в районе ЗАТО г. Озёрск. Водоём находится на территории промышленной площадки ПО "Маяк" и является водоёмом-хранилищем низкоактивных радиоактивных отходов. Водоём В-4 создан на р. Тече в результате реконструкции старой плотины Метлинского пруда (ныне плотина П-4) в 1956 г. [9]. Современный юридический статус водоёма В-4 получил в 2010 г. по итогам межведомственного решения (Госкорпорация "Росатом", Минприроды России, Ростехнадзор)

как объект использования атомной энергии (ОИАЭ) – поверхностный водоём-хранилище жидких радиоактивных отходов (ВХЖРО).

Средняя глубина В-4 – 3,1 м при нормальном подпорном уровне (НПУ); наибольшие длина и ширина – 3 км и 0,65 км соответственно; длина береговой линии – 9 км. Параметры водоёма указаны в табл. 1. Рельеф территории вокруг водоёма холмисто-увалистый, в понижениях образованы многочисленные болота. Бассейн реки Течи в горной зоне, где находится верховье реки, сложен кристаллическими сланцами, гнейсами и земнокаменными туфами.

Берега пологие, заросшие тростником, рогозом; котловина водоёма вытянута с запада на восток. В северо-западной части водоёма открытой воды нет: бывшее русло р. Течи почти не обозначено, всё заросло тростником. Береговая линия слабоизрезанная.

Дно повторяет рельеф речной долины, наибольшая глубина приурочена к бывшему руслу р. Течи в юго-восточной части водоёма. Основу грунтов составляют аллювиальные, болотно-аллювиальные и болотные образования четвертичного возраста. Донные отложения в основном представлены грубым растительным детритом и сапропелями [9].

Работы по комплексному исследованию биоценозов водоёма В-4 проводили в летне-осенний период 2016 г.

Определение распределения глубин по акватории водоёма В-4. Измерения глубин водоёма проводили для обоснованного выбора станций отбора проб. При определении распределения глубин по акватории водоёма В-4 использовали GPS-навигатор Garmin 62s и эхолот Humminbird 737. Измерение глубин проводили в расположенных на акватории узлах сетки, изображённой на рис. 1 (не менее 180 точек).

Точки измерения поставлены в навигаторе, результаты измерений записаны в журнал и в память эхолота.

Гамма-съёмка. Измерение МЭД на дне проводили для обоснованного выбора станций отбора проб, измерения выполняли с использованием дозиметра ДКГ-02У "Арбитр-М", погружаемого на дно в герметичной упаковке, закреплённой на разработанной ранее платформе, предотвращающей погружение прибора в донные отложения и обеспечивающей стандартизацию условий измерения. Измерения МЭД на дне проводили в расположенных на акватории узлах сетки, изображённой на рис. 2 (не менее 45 точек). Точки измерения МЭД совпадают с точками измерения глубин. Результаты измерения записаны в журнал и в память прибора.

Отбор проб воды для определения химического состава воды. Отбор проб воды проводили ежемесячно на штатной станции отбора проб для производственного экологического мониторинга ПО "Маяк" вблизи плотины П-4. Количественный гидрохимический анализ проводили по 13 показателям с использованием стандартных методик [10].

Отбор проб воды, донных отложений, биоты для измерения содержания радионуклидов. Измеряли содержание основных дозобразующих радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr [11]. Для определения содержания радионуклидов использовали пробы воды, донных отложений и биоты, отобранные в мае-октябре 2016 г. на всех исследуемых станциях водоёма В-4. Пробы воды отбирали с поверхности водоёма в подготовленную чистую тару, пробы донных отложений отбирали с помощью ковшового дночерпателя с площадью захвата 0,025 м².

Содержание ^{137}Cs определялось гамма-спектрометрическим методом на спектрометре

Таблица 1

Параметры водоёма В-4

| Параметры | Минимальный уровень | Нормальный подпорный уровень (НПУ) | Максимальный уровень | Гребень плотины |
|---|---------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------|
| Отметка над уровнем моря, Балтийская система, м | 219,8 | 219,8 | 220,2 | 222,1 |
| Площадь зеркала, км ² | 1,3 | 1,3 | 1,5 | – |
| Объём, млн м ³ | 4,0 | 4,0 | 4,6 | – |

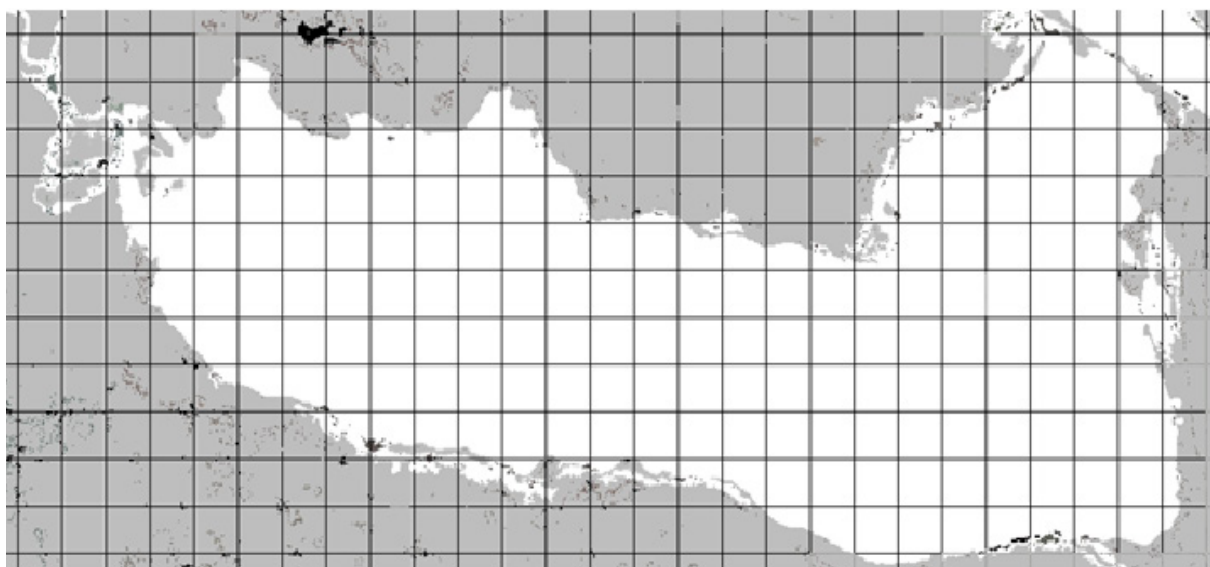


Рис. 1. Сетка измерений глубины на водоёме В-4

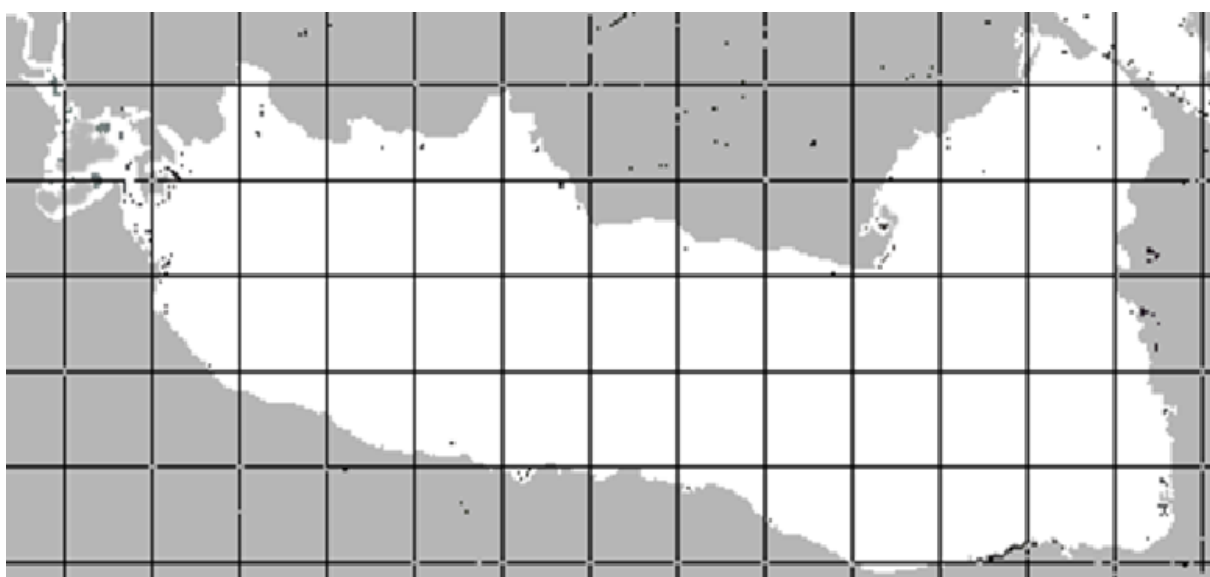


Рис. 2. Сетка измерений МЭД на дне водоёма В-4

с полупроводниковым детектором УСК "Гамма-плюс" с особо чистым германием (HPGe). Погрешность измерений не превышала 20 %. В воде и малоактивных пробах ^{137}Cs определяли радиохимически сурьмяно-йодидным методом.

Концентрация ^{90}Sr в пробах определялась

посредством радиохимического выделения ^{90}Y с последующим измерением его активности на малофоновой β -метрической установке типа УМФ-2000 и пламенно-фотометрическим контролем выхода носителя стронция. Погрешность измерения ^{90}Sr составляет 20 %

при активности $<0,7$ Бк/г и 10 % при больших активностях.

Расчёт мощности поглощённой дозы для биоты радиоактивно загрязнённых водоёмов. На основании данных о содержании радионуклидов в воде, донных отложениях и образцах фитопланктона, зоопланктона, зообентоса, макрофитов и рыбы проводили расчёт мощности дозы с помощью пакета ERICA ASSESSMENT TOOLS V.2.0 [12].

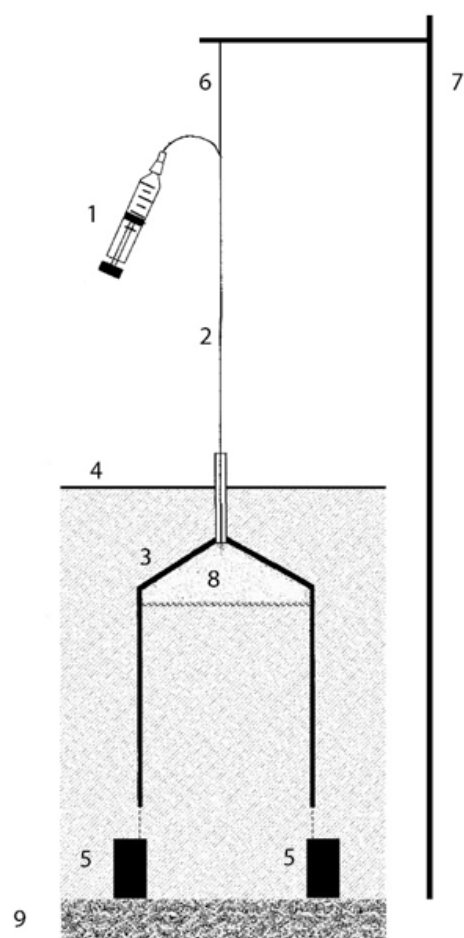
Отбор и обработка проб фито- и зоопланктона, зообентоса, перифитона и высшей водной растительности. Пробы планктона и бентоса отбирали с четырёх станций отбора проб в июне, июле и августе. Для отбора проб фито- и зоопланктона использовали батометр Руттнера и сачок из мельничного газа № 160. Отбор проб проводили с поверхности и далее через каждые 0,5 м до дна. Отбор проб зообентоса на каждой станции осуществляли с помощью ковшового дночерпателя с площадью захвата $0,025 \text{ м}^2$ [13]. Содержимое дночерпателя промывали в воде водоёма через сито для зообентоса. Промытый остаток помещали в полиэтиленовое ведро объёмом 1 л. Разбор проб зообентоса осуществлялся в лаборатории в соответствии с руководством по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем [14].

Пробы перифитона отбирали путём смывания или соскабливания организмов с различных естественных субстратов в ёмкость с фиксатором. Пробы высшей водной растительности отбирали с площади 1 м^2 после установки квадратной рамки. Отобранные пробы разделяли на отдельные виды и взвешивали на электронных весах с точностью до 0,1 г.

Разбор проб и определение таксономической принадлежности планктона, бентоса, перифитона и макрофитов проводили по соответствующим определителям с использованием микроскопов Nikon Eclipse 50i (Nikon, Япония), Zeiss Imager.M2 (Zeiss, Германия) и Zeiss Stereo Discovery.V12 (Zeiss, Германия).

Определение показателей интенсивности продукции фитопланктона и деструкции органического вещества проводили один раз за сезон. Минимальное значение чистой первичной продукции фитопланктона за промежуток времени было определено как прирост биомассы фитопланктона за этот промежуток.

Определение минимального значения суточной суммарной аэробной и анаэробной деструкции органического вещества проводилось с помощью учёта газовыделения с поверхности донных отложений в толще воды. На трёх станциях отбора проб определяли объём газа, образующегося под 1 м^2 поверхности воды и выходящего на поверхность в виде пузырьков (количество растворённых газов не учитывали). Для этого была сконструирована система для сбора пузырьков газа (рис. 3). Площадь воронки для сбора пузырьков газа составляла



1 – шприц для сбора газов, 2 – трубка, 3 – собирающий конус, 4 – поверхность воды, 5 – грузы, 6 – верёвка, 7 – штатив, 8 – собранные газы, 9 – дно водоёма

Рис. 3. Установка для сбора пузырьков газа

188,7 см². Установка находилась в водоёме в течение 11 сут с 12 по 23 августа 2016 г. По окончании экспозиции скопившийся газ собирали и измеряли его объём с помощью шприца, рассчитывали объём газа в пересчёте на 1 м² поверхности воды.

Определение продукции макрофитов проводили один раз за сезон. Отбор проб проводился на стандартных станциях в трёх повторностях, выбор точек отбора производился с учётом характера роста макрофитов. Точки отбора располагались в радиусе примерно 20 м от станции на открытой воде или на ближайшей точке берега (в случае прибрежной растительности).

На каждой точке – при работе на открытой воде – на поверхность воды клали рамку 1×1 м с поплавками, по углам втыкали в дно жерди таким образом, чтобы рамка не могла смещаться. Затем с помощью грабеля и косы доставали все макрофиты в пределах площади рамки до дна, складывали в таз. Сортировали по видам, раскладывали в пакеты, подписывали. Взвешивали на берегу, предварительно слив с пакета стёкшую воду. В случае прибрежной растительности (гелофиты) клали рамку на растения недалеко от уреза воды, скашивали с помощью косы и ножа все растения в пределах рамки, сортировали по видам, взвешивали каждый вид отдельно.

Анализ показателей крови и кроветворения у рыб на примере плотвы водоёма В-4. Отлов рыбы проводили в летний период. Вылов рыбы проводили с использованием электроудочки. Отбор крови проводили у плотвы из хвостовых кровеносных сосудов с помощью одноразового шприца с иглой, предварительно смоченных гепарином. Содержание глюкозы, ионов Na, K, Cl, гематокрит определяли с помощью анализатора iSTAT (Abbott, США).

Кроме этого, у плотвы, вскрыв брюшную полость, выделяли головную часть почки, аккуратно отделяли её стоматологическим шпателем от позвоночного столба и незамедлительно фиксировали в 10 % нейтральном формалине. Для дальнейшего морфологического исследования фиксированные в формалине органы подвергали стандартной гистологической проводке в гистопроцессоре SAKURA Tissue-Tek VIP 5, после изготавливали парафиновые блоки

и осуществляли микротомию. Полученные при микротомии срезы депарафинировали и окрашивали гематоксилином Майера в течение 10 мин и спиртовым раствором эозина в течение 10 сек, далее срезы отмывали от избытков красителя, обезвоживали, просветляли и заключали под покровное стекло. Анализ готовых срезов осуществляли на микроскопе Axio SCOPE.A1 производства Carl Zeiss [15].

На гистологических препаратах осуществляли подсчёт количества гемопоэтических клеток и мелано-макрофагальных центров (ММЦ). Также считали суммарную площадь ММЦ в головной части почки, и рассчитывали соотношение площади ММЦ относительно площади всей головной части почки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ глубин и мощности амбиентной дозы на поверхности донных отложений водоёма В-4. Распределение глубин и значений мощности эквивалента дозы на дне водоёма В-4 приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

Как и для всех водохранилищ руслового типа, для водоёма В-4 характерно увеличение глубины от верховьев к приплотинной части. Наибольшие уровни мощности эквивалента дозы отмечаются в верховье, что связано с характером поступления загрязнения и меньшим экранированием новыми осадками загрязнённых донных отложений при более высокой скорости течения.

По результатам измерения глубин и МЭД на дне и анализа предыдущих наблюдений [1, 11, 16] было выбрано четыре станции регулярного отбора проб (рис. 6). Станция В4/1 располагается в верховье водоёма, где гидрологический режим приближён к речному. Станция В4/2 располагается близко к центру водоёма. Станция В4/3 характеризует особенности прибрежного биотопа. Станция В4/4 располагается в наиболее глубокой и малопроточной части водоёма.

Анализ химического состава воды. Результаты гидрохимического анализа представлены в табл. 2. Особенностью химического состава воды водоёма В-4 является высокое содержание органических веществ, что проявляется в повышении показателей химического

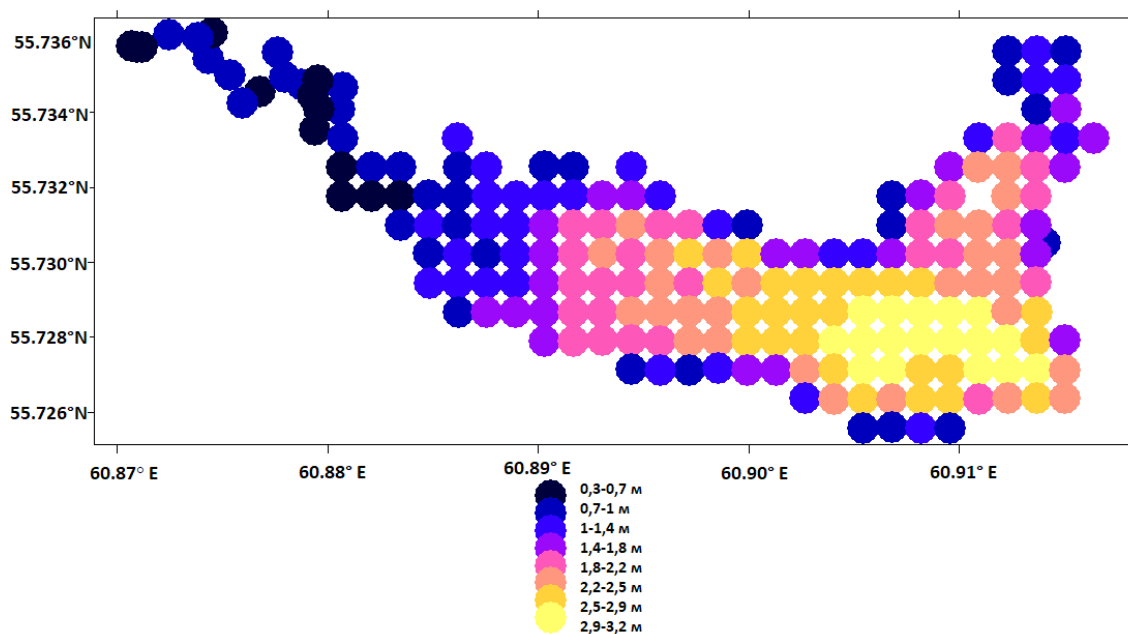


Рис. 4. Карта глубин водоёма В-4. Координаты точек измерения: по оси X – градусы восточной долготы; по оси Y – градусы северной широты

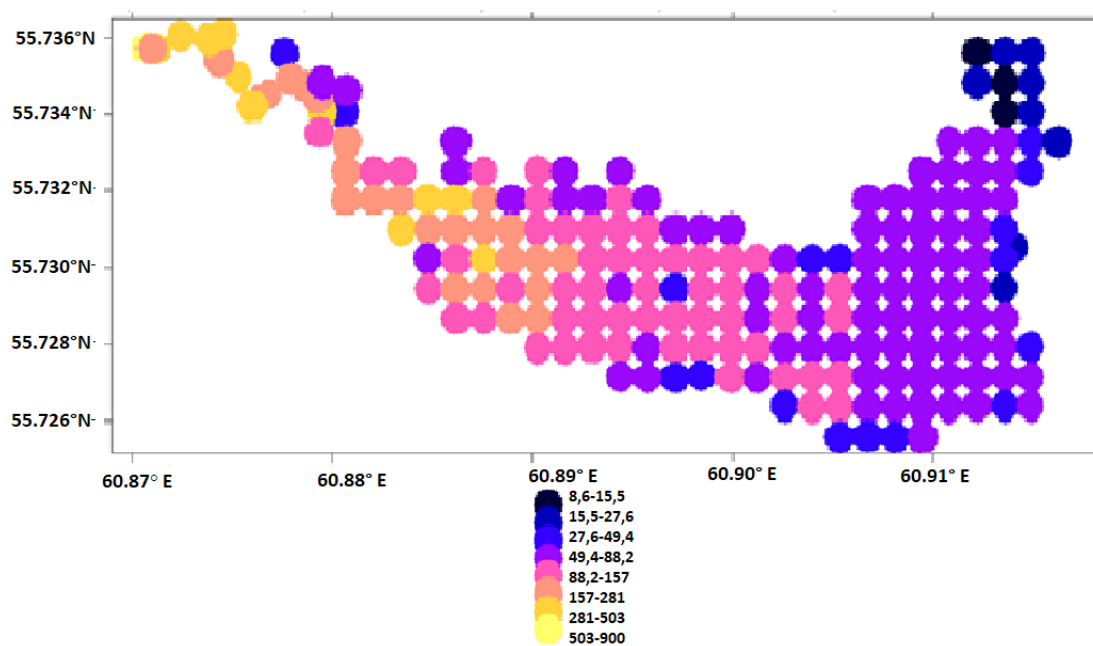


Рис. 5. Карта мощности амбиентного эквивалента дозы на поверхности донных отложений водоёма В-4, мкЗв/ч. Координаты точек измерения: по оси X – градусы восточной долготы; по оси Y – градусы северной широты

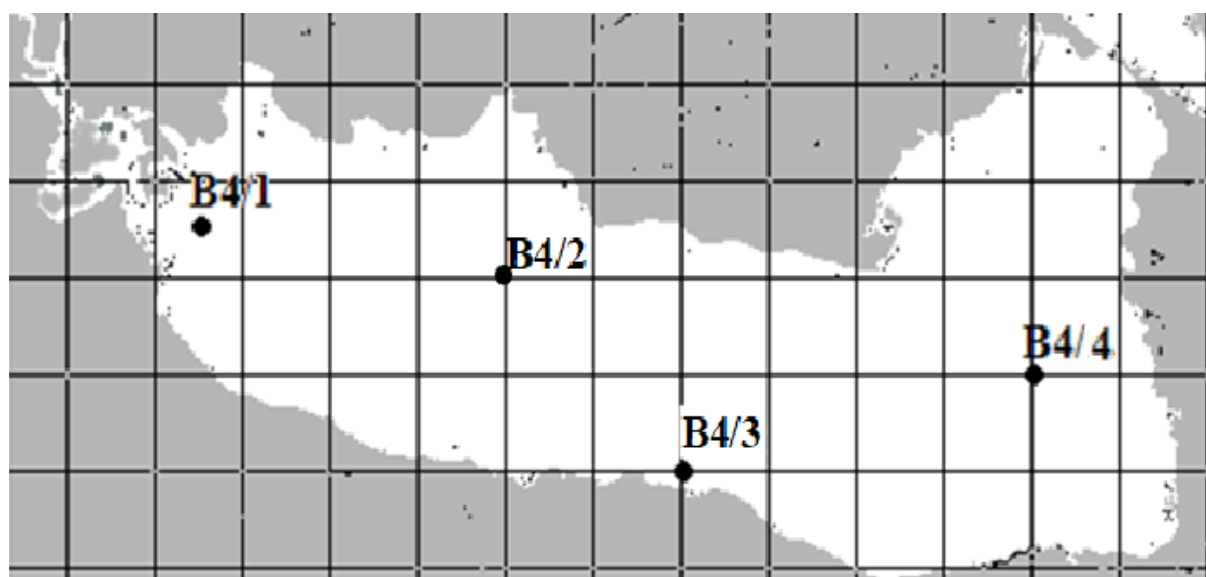


Рис. 6. Станции отбора проб на водоёме В-4

Таблица 2

Химический состав воды водоёма В-4, 2016 г.

| Показатели | Единица измерения | ПДК _{крз} | Сроки отбора проб | | |
|--------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------|--------|
| | | | июнь | июль | август |
| хлорид-ион | мг/л | 300 | 52,3 | 49 | 44,5 |
| сульфат-ион | мг/л | 100 | 59,5 | 42,1 | 34,1 |
| ион аммония | мг/л | 0,5 | 0,96 | 0,45 | 0,55 |
| нитрат-ион | мг/л | 40 | 0,12 | < 0,1 | < 0,1 |
| нитрит-ион | мг/л | 0,08 | < 0,02 | < 0,02 | 0,028 |
| фосфат-ион | мг/л | 0,61 | < 0,05 | < 0,05 | 0,131 |
| цинк | мг/л | 0,01 | <0,005 | 0,015 | 0,014 |
| медь | мг/л | 0,001 | 0,004 | 0,002 | 0,004 |
| железо общее | мг/л | 0,1 | 0,13 | 0,13 | <0,05 |
| магний | мг/л | 40,0 | 26,5 | 23,7 | 24,5 |
| кальций | мг/л | 180,0 | 28,4 | 27,0 | 26,3 |
| окисляемость бихроматная | мгО/л | — | 66 | 57 | 83 |
| минеральный остаток | мг/л | — | 256 | 245 | 289 |

Примечание. ПДК_{крз} – предельно допустимая концентрация для водоёмов рыбохозяйственного значения в соответствии с приказом Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. N 552.

потребления кислорода (бихроматной окисляемости), высокой концентрации фосфатов, иона аммония. Также отмечалось превышение предельно допустимых концентраций для водо-

ёмов рыбохозяйственного значения по концентрации в воде некоторых тяжёлых металлов.

Оценка радиационного воздействия.
Содержание основных дозообразующих

радионуклидов в воде, донных отложениях и гидробионтах приведены в табл. 3–5. Распределение ^{90}Sr в воде было относительно равномерным и находилось в пределах от 5,0 до 6,1 кБк/л. Содержание ^{137}Cs в воде изменялось от 0,46 до 0,69 кБк/л. В донных отложениях колебания удельной активности радионуклидов были более широкими, изменяясь от 0,84 до 4,8 МБк/кг сухой массы для ^{90}Sr и от 6,8 до 15 МБк/кг сухой массы для ^{137}Cs .

Содержание ^{90}Sr в гидробионтах было минимальным в прибрежно-водных растениях – 240 кБк/кг сырой массы. Далее в порядке возрастания следовали ихтиофауна (плотва), фитопланктон, погружённые высшие водные растения, зоопланктон и зообентос – 3,7 МБк/кг сырой массы. Содержание ^{137}Cs было минимальным в фитопланктоне – 65 кБк/кг сырой массы. Затем в порядке возрастания следуют зообентос, ихтиофауна (плотва), прибрежно-водная растительность, погружённые высшие водные растения, максимальное значение отмечено для зоопланктона – 570 кБк/кг сырой массы.

В табл. 6 представлены расчётные значения мощности дозы для гидробионтов. Расчёты показали, что минимальный уровень радиационного воздействия был характерен для зоопланктона, обитающего в толще воды, и составлял 7 мГр/сут. Максимальный уровень радиационного воздействия был отмечен для организмов, обитающих на дне. Мощность дозы для личинок насекомых, обитающих на дне водоёма В-4, составила 115 мГр/сут. Следует отметить, что в водоёме В-4 для всех групп организмов, кроме зоопланктона, мощность дозы превышала

Таблица 3

Содержание радионуклидов в воде водоёма В-4, летний период 2016 г.

| Содержание радионуклидов в воде, Бк/л | | |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Станции отбора проб | ^{90}Sr | ^{137}Cs |
| В-4/1 | $(5,8 \pm 0,8) \cdot 10^3$ | $(6,9 \pm 1,0) \cdot 10^2$ |
| В-4/2 | $(5,0 \pm 0,7) \cdot 10^3$ | $(4,6 \pm 0,7) \cdot 10^2$ |
| В-4/3 | $(6,1 \pm 0,8) \cdot 10^3$ | $(5,1 \pm 0,7) \cdot 10^2$ |
| В-4/4 | $(5,3 \pm 0,7) \cdot 10^3$ | $(5,3 \pm 0,8) \cdot 10^2$ |

Таблица 4

Содержание радионуклидов в донных отложениях водоёма В-4, летний период 2016 г.

| Содержание радионуклидов в донных отложениях, Бк/кг сухой массы | | |
|---|----------------------------|------------------------------|
| Станции отбора проб | ^{90}Sr | ^{137}Cs |
| В-4/1 | $(8,4 \pm 1,2) \cdot 10^5$ | $(1,50 \pm 0,10) \cdot 10^7$ |
| В-4/2 | $(2,2 \pm 0,3) \cdot 10^6$ | $(6,8 \pm 0,6) \cdot 10^6$ |
| В-4/3 | $(4,8 \pm 0,7) \cdot 10^6$ | $(7,2 \pm 0,6) \cdot 10^6$ |
| В-4/4 | $(3,2 \pm 0,5) \cdot 10^6$ | $(9,8 \pm 0,9) \cdot 10^6$ |

Таблица 5

Содержание радионуклидов в компонентах биоты водоёма В-4, летний период 2016 г.

| Группа организмов | Содержание радионуклидов, Бк/кг сырой массы | |
|-------------------------|---|--------------------------|
| | ^{90}Sr | ^{137}Cs |
| Фитопланктон | $(8,3 \pm 2,5) \cdot 10^5$ | $6,5 \pm 1,9 \cdot 10^4$ |
| Зоопланктон | $(1,3 \pm 0,4) \cdot 10^6$ | $5,7 \pm 1,7 \cdot 10^5$ |
| Зообентос (моллюски) | $(3,7 \pm 0,5) \cdot 10^6$ | $6,8 \pm 0,7 \cdot 10^4$ |
| Ихтиофауна (плотва) | $(5,8 \pm 0,5) \cdot 10^5$ | $1,4 \pm 0,4 \cdot 10^5$ |
| Макрофиты (гелофиты) | $(2,4 \pm 0,5) \cdot 10^5$ | $2,6 \pm 0,4 \cdot 10^5$ |
| Макрофиты (погружённые) | $(8,8 \pm 2,4) \cdot 10^5$ | $4,5 \pm 0,7 \cdot 10^5$ |

Таблица 6

Мощность дозы для представителей биоты водоёма В-4, летний период 2016 г.

| Группа организмов | Мощность дозы | |
|-------------------------|---------------|---------|
| | мкГр/ч | мГр/сут |
| Фитопланктон | 478 | 11 |
| Зоопланктон | 293 | 7 |
| Зообентос | 4788 | 115 |
| Ихтиофауна (плотва) | 403 | 10 |
| Макрофиты (гелофиты) | 2740 | 66 |
| Макрофиты (погружённые) | 2942 | 71 |

400 мкГр/ч – уровень радиационного воздействия, определённый как пороговый для развития детерминированных популяционных эффектов для водных организмов [17]. Это говорит о том, что для гидробионтов водоёма В-4 можно ожидать развития радиационно индуцированных эффектов на уровне популяций, сообществ, биосферы в целом.

Состояние фитопланктонного сообщества. Оценка состояния фитопланктона является обязательной в системе государственного экологического мониторинга пресноводных экосистем [5, 6]. В ранее проведённых работах была выявлена зависимость показателей фитопланктона от уровня радиационного воздействия при радиоактивном загрязнении пресноводных экосистем [18, 19].

Всего в пробах фитопланктона (учитывались количественная и качественная пробы) было идентифицировано 86 видов и внутривидовых таксонов фитопланктонных организмов (табл. 7). Вклад различных систематических групп был следующим: Cyanophyta (Цианобактерии) – 18 видов, Bacillariophyta (Диатомовые) – 15, Chlorophyta (Зелёные) – 45, Dinophyta (Динофлагелляты) – 1, Euglenophyta (Эвгленовые) – 5, Xanthophyta (Желтозелёные) – 1, Cryptophyta (Криптофитовые) – 1.

Как видно из табл. 7, периоды отбора не отличались существенно по числу видов, максимальное число видов составило 56, минимальное – 25. В целом видовое разнообразие оказалось достаточно невысоким. Наиболее высока насыщенность видами таких отделов, как цианобактерии и зелёные водоросли, что характерно для водоёмов данного типа (стоячие водоёмы с выраженным процессом эвтрофикации).

Список видов, входивших в состав фитопланктона водоёма В-4 в период проведения работ, представлен в табл. 8. Показатели количественного развития фитопланктона приведены в табл. 9.

Следует отметить значительные колебания численности и биомассы по акватории водоёма в течение всего периода наблюдений. Минимальные значения численности и биомассы отмечены в начале лета, максимальные – в середине, к концу лета наметилось снижение показателей количественного развития. Также отмечено увеличение доли цианобактерий как по численности, так и по биомассе в течение лета. В целом, роль цианобактерий была велика в течение всего периода проведения работ, что является характерным для высокотрофных водоёмов.

В соответствии с классификацией эффектов антропогенного воздействия на водные экосистемы (РД 52.24.620-2000) состояние водоёма В-4 может быть определено как антропогенное эвтрофирование.

Определение показателей интенсивности продукции фитопланктона и деструкции органического вещества. Оценку проводили один раз за сезон. Минимальное значение чистой первичной продукции фитопланктона за промежуток времени было определено как прирост биомассы фитопланктона за этот промежуток. Прирост средней биомассы фитопланктона за месяц составил 23 ± 13 г/л, что соответствует $0,9 \pm 0,5$ г/л сырого органического вещества, или $0,13 \pm 0,07$ г/л сухого органического вещества, или $0,09 \pm 0,05$ г/л углерода. В пересчёте на площадь поверхности минимальное значение суточной чистой первичной продукции углерода составляет 240 ± 130 мг/м².

Таблица 7

Количество обнаруженных видов, 2016 г.

| Период | Общее число видов на станции | Число видов на станции по группам | | | |
|---------------|------------------------------|-----------------------------------|------------|--------------|---------------|
| | | Цианобактерии | Диатомовые | Зелёные | Другие |
| Начало лета | 47±8 (25–56) | 7±3 (3–10) | 7±2 (5–8) | 29±9 (15–35) | 4±2 (2–5) |
| Середина лета | 47±6 (40–52) | 12±4 (7–15) | 7±2 (6–9) | 23±2 (21–25) | 4±2 (3–6) |
| Конец лета | 40±7 (30–50) | 12±4 (8–16) | 3±2 (1–5) | 22±7 (15–29) | 4,0±1,3 (3–5) |

Примечание: Приведены средние значения и ошибка среднего; в скобках приведены минимальное и максимальное значение за период.

Таблица 8

Список видов в составе фитопланктона водоёма В-4 за период проведения работ, 2016 г.

| | |
|---|--|
| <p>Cyanophyta <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (L.) Ralfs. <i>Aphanocapsa conferta</i> (W.et G.S.West) Kom.-Legn. Et Cronb. <i>Anabaena circinalis</i> Rabenh. ex Born. et Flah. <i>Anabaena flos-aquae</i> (L.) Ralfs. <i>Anabaena lemmermannii</i> P. Richt. <i>Anabaena planctonica</i> Brunnth. <i>Anabaenopsis Elenkinii</i> Miller <i>Arthrospira</i> sp. <i>Chroococcus limneticus</i> f. limneticus Lemm. <i>Gloeocapsa minuta</i> (Kutz.) Hollerb. <i>Merismopedia punctata</i> Meyen <i>Merismopedia tenuissima</i> Lemm. <i>Microcystis aeruginosa</i> Kütz.emend Elenk. <i>Microcystis wesenbergii</i> Kom. <i>Oscillatoria</i> sp. <i>Geitlerinema amphibium</i> Ag. ex Gom. <i>Woronichinia compacta</i> (Lemm.) Kom. et Hind. <i>Woronichinia naegeliana</i> (Ung.) Elenk.</p> <p>Bacillariophyta <i>Amphipleura pellucida</i> Kutz. <i>Aulacoseira granulata</i> (Ehr.) Sim. <i>Asterionella formosa</i> Hass. <i>Cocconeis placentula</i> <i>Cyclotella</i> sp. <i>Cymbella</i> sp. <i>Fragilaria capucina</i> Desm. <i>Gomphonema olivaceum</i> (Hornemann) Ehr. <i>Navicula radiosa</i> Kutz. <i>Navicula</i> sp. <i>Nitzschia</i> sp. <i>Stauroneis anceps</i> Ehr. <i>Synedra acus</i> Kutz.</p> <p>Dynophyta <i>Peridinium</i> sp.</p> <p>Euglenophyta <i>Euglena</i> sp. <i>Euglena acus</i> Ehr. var. acus <i>Monomorphina pyrum</i> (Ehr.) Mereschk. <i>Trachelomonas</i> sp. <i>Trachelomonas intermedia</i> Dang.</p> <p>Xanthophyta <i>Pseudostaurastrum hastatum</i> (Reinsch.) Chod.</p> <p>Cryptophyta <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr.</p> | <p>Chlorophyta <i>Aktinastrum hantschii</i> Lagerh. <i>Binuclearia lauterbornii</i> (Schmidle) Pr.-Lavrenko <i>Closterium acutum</i> Breb. <i>Coelastrum astroideum</i> De-Not. <i>Coelastrum microporum</i> Nägeli. <i>Coenococcus planctonicus</i> Korsch. <i>Cosmarium retusiforme</i> (Wille) Gutw. <i>Crucigenia quadrata</i> Morren. <i>Crucigenia tetrapedia</i> (Kirchn.) W. et W. <i>Crucigeniella apiculata</i> (Lemm.) Kom. <i>Dictyosphaerium ehrenbergianum</i> Näg. <i>Dictyosphaerium pulchellum</i> H. Wood <i>Didymocystis planctonica</i> Korsch. <i>Elakotothrix genevensis</i> (Reverd.) Hind. <i>Lagerheimia ciliata</i> (Lagerh.) Chodat. <i>Monoraphidium arcuatum</i> (Korsch.) Hind. <i>Monoraphidium contortum</i> (Thur. in Breb.) Kom.-Legn. <i>Monoraphidium griffithii</i> (Berk.) Kom.-Leng. <i>Monoraphidium minutum</i> (Näg.) Kom.-Legn. <i>Oocystis borgei</i> Snow <i>Oocystis lacustris</i> Chod. <i>Oocystis rhomboidea</i> Fott. <i>Pediastrum duplex</i> Meyen <i>Pediastrum boryanum</i> Turp.Menegh. <i>Pediastrum tetras</i> (Ehrenb.) Ralfs. <i>Raphidocelis danubiana</i> (Hind.) Marv. et al. <i>Raphidocelis sigmoidea</i> Hindak <i>Scenedesmus acuminatus</i> (Lagerh.) Chodat. <i>Scenedesmus acutus</i> Meyen <i>Scenedesmus arcuatus</i> Lemm. (Lemm.) <i>Scenedesmus bicaudatus</i> Dedussenko <i>Scenedesmus ecornis</i> (Ehr.) Chod. <i>Scenedesmus obliquus</i> (Turp.) Kutz. <i>Scenedesmus opoliensis</i> P.Richter var. Opoliensis <i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turp.) Brébisson <i>Selenastrum bibraianus</i> Reinsch <i>Sphaerocystis planctonica</i> (Korsch.) Bourr. <i>Sphaerocystis schroeteri</i> Chodat. <i>Staurastrum gracile</i> Ralfs. var. gracile <i>Tetrachlorella alterans</i> (G.M. Smith) Korsch. <i>Tetraedron caudatum</i> (Corda) Hansgirg <i>Tetraedron incus</i> (Teil.) G.M.Smith <i>Tetraedron minimum</i> (A. Br.) Hansgirg <i>Tetraedron triangulare</i> Korsch. <i>Ulotrix zonata</i> (Web. et Mohr) Kutz.</p> |
|---|--|

Таблица 9

 Общая численность и биомасса фитопланктона водоёма В-4
и относительный вклад водорослей различных отделов, 2016 г.

| Дата | Показатель | Значение | Доля отдельных групп, % | | | |
|---------------|------------|------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | Цианобактерии | Диатомовые | Зелёные | Другие |
| Начало лета | Ч | 70±15 (16–97) | (8,8–60,4) | (2,7–7,5) | (34,4–46,8) | (1,4–42,1) |
| | Б | 19,0±1,0 (16–21) | (0,6–15,2) | (2,4–29,6) | (7,8–42,8) | (19,8–89,2) |
| Середина лета | Ч | 160±40 (70–236) | (73,8–83,7) | (5,5–11,2) | (8,2–19,1) | (0,4–1,6) |
| | Б | 40±10 (16–58) | (34,0–45,5) | (31,6–55,9) | (3,9–10,4) | (5,6–18,8) |
| Конец лета | Ч | 110±40 (50–190) | (60,5–88,1) | (0,6–2,3) | (6,8–12,6) | (0,1–1,0) |
| | Б | 30±10 (10–50) | (45,3–59,2) | (2,4–4,0) | (12,2–15,6) | (15,2–25,1) |

Примечание: Ч – численность, млн/л, Б – биомасса, мг/л; приведены средние значения и ошибка среднего; в скобках приведены минимальное и максимальное значение за период.

Определение минимального значения суточной суммарной аэробной и анаэробной деградации органического вещества проводилось с помощью учёта газовыделения с поверхности донных отложений и в толще воды. Было получено значение 370 ± 60 мл газов в сутки с 1 м^2 , что соответствует $0,20 \pm 0,03$ г углерода. Таким образом, в период проведения исследований интенсивность продукции органического вещества на три порядка превышала интенсивность деградации.

Показатели, характеризующие состояние зоопланктона. Оценка состояния зоопланктона является обязательной в системе государственного экологического мониторинга пресноводных экосистем [5, 6]. В ранее проведённых работах была выявлена зависимость показателей зоопланктона от уровня радиационного воздействия при радиоактивном загрязнении пресноводных экосистем [20, 21].

Оценку проводили дважды в месяц: оценивали численность, биомассу, видовой состав зоопланктона. Анализ проб зоопланктона из водоёма В-4 показал, что в состав зоопланктона входят представители трёх основных групп: коловраток (Rotifera), ветвистоусых (Cladocera, Crustacea) и веслоногих (Copepoda, Crustacea) ракообразных. Коловраток было обнаружено 33 вида и формы, кладоцер – 11 видов, копепоид – 9 видов. Наибольший процент встречаемости имели *Anuraeropsis fissa fissa* (Gosse, 1851), *Filinia longiseta longiseta* (Ehrenberg, 1834), *Keratella cochlearis tecta*

(Gosse, 1851), *Trichocerca pusilla* (Lauterborn, 1898) и *Mesocyclops leuckartii* (Claus, 1857). Список отмеченных в 2016 г. видов приведён в табл. 10. Количество видов по станциям и периоду отбора проб представлено в табл. 11.

Численность и биомасса зоопланктона изменялись в широких пределах (табл. 12). Отмечено увеличение биомассы зоопланктона по ходу лета. В целом, для верховья (станция В-4/1) характерны более низкие показатели количественного развития, что связано с особым гидрологическим режимом этой части водоёма, с наиболее высокой скоростью течения. В течение всего периода наблюдений по численности преобладали коловратки, составляя до 96,6 %. Высок их вклад был и в биомассу – от 7,6 до 52,7 %. Значение коловраток в формировании численности и биомассы зоопланктонного сообщества усиливалось к концу лета. Подобная картина характеризует водоём В-4 как эвтрофный.

В соответствии с классификацией водных экосистем по уровню экологического регресса (РД 52.24.633-2002. Методические основы создания и функционирования подсистемы мониторинга экологического регресса пресноводных экосистем) по показателю доли коловраток в общей численности зоопланктонного сообщества экосистема водоёма В-4 демонстрирует признаки экологического регресса.

Показатели зообентоса и перифитона. Оценка состояния зообентоса и перифитона является обязательной в системе государственного

Таблица 10

Список видов зоопланктона, обнаруженных в пробах водоёма В-4 в 2016 г.

| | |
|--|---|
| Rotifera <i>Anuraeropsis fissa fissa</i> (Gosse, 1851) <i>Asplanchna brightwellii</i> (Gosse, 1850) <i>Asplanchna girodi</i> (Guerne, 1888) <i>Brachionus angularis angularis</i> (Gosse, 1851) <i>Brachionus calyciflorus calyciflorus</i> (Pallas, 1766) <i>Brachionus diversicornis diversicornis</i> (Daday, 1883) <i>Brachionus quadridentatus</i> (Hermann, 1783) <i>Colurella obtusa obtusa</i> (Gosse, 1886) <i>Euchlanis dilatata dilatata</i> (Ehrenberg, 1832) <i>Filinia longiseta longiseta</i> (Ehrenberg, 1834) <i>Filinia terminalis</i> (Plate, 1886) <i>Kellicottia longispina longispina</i> (Kellicott, 1879) <i>Keratella cochlearis cochlearis</i> (Gosse, 1851) <i>Keratella cochlearis hispida</i> (Lauterborn, 1898) <i>Keratella cochlearis tecta</i> (Gosse, 1851) <i>Keratella quadrata quadrata</i> (Muller, 1786) <i>L. (Monostyla) closterocerca</i> (Schmarda, 1859) <i>Lecane (Monostyla) ozolini</i> (Berzins, 1943) <i>Lecane (Monostyla) rugosa</i> (Harring, 1914) <i>Lepadella clossa</i> (Wulfert, 1960) <i>Lepadella ovalis</i> (Muller, 1896) <i>Mytilina mucronata mucronata</i> (Muller, 1773) <i>Mytilina ventralis brevispina</i> (Ehrenberg, 1832) <i>Polyarthra minor</i> (Voigt, 1904) <i>Polyarthra remata</i> (Skorikov, 1896) <i>Polyarthra vulgaris</i> (Carlin, 1943) <i>Pompholyx sulcata</i> (Hudson, 1885) | <i>Testudinella patina</i> (Hermann, 1783) <i>Trichocerca longistyla</i> (Olofsson 1918) <i>Trichocerca porcellus</i> (Gosse, 1886) <i>Trichocerca pusilla</i> (Lauterborn, 1898) <i>Trichocerca rattus</i> (Müller 1776) <i>Trichocerca similis</i> (Wierzejski, 1893) Cladocera <i>Bosmina longirostris</i> (O.F. Muller, 1785) <i>Ceriodaphnia pulchella</i> (Sars, 1862) <i>Chydorus sphaericus</i> (O.F. Muller, 1785) <i>Daphnia cucullata</i> (G.O. Sars, 1862) <i>Daphnia galeata</i> (G.O. Sars, 1864) <i>Diaphanosoma mongolianum</i> (Ueno, 1938) <i>Leptodora kindtii</i> (Focke, 1844) <i>Leydigia acanthocercoides</i> (Fischer, 1854) <i>Oxyurella tenuicaudis</i> (G.O. Sars, 1862) <i>Pleuroxus aduncus</i> (Jurine, 1820) <i>Simocephalus vetulus</i> (Müller, 1776) Copepoda <i>Cyclops abyssorum</i> (Sars, 1863) <i>Cyclops scutifer</i> (Sars, 1863) <i>Eucyclops macrurus</i> (Sars, 1863) <i>Eucyclops serrulatus</i> (Fischer, 1851) <i>Eudiatomus graciloides</i> (Lilljeborg, 1888) <i>Macrocyclus albidus</i> (Jurine, 1820) <i>Mesocyclops leuckartii</i> (Claus, 1857) <i>Paracyclops affinis</i> (Sars, 1863) <i>Thermocyclops oithonoides</i> (Sars, 1863) |
|--|---|

Таблица 11

Количество обнаруженных видов на станциях, 2016 г.

| Период | Число видов | Коловратки | Ветвистоусые ракообразные | Веслоногие ракообразные |
|---------------|--------------|--------------|------------------------------|----------------------------|
| Начало лета | 19±2 (15–27) | 10±2 (7–19) | 4±0,5 (3–6) | 4±0,5 (3–6) |
| Середина лета | 23±2 (19–32) | 13±1 (10–19) | 5±0,5 (4–8) | 5±0,5 (4–8) |
| Конец лета | 22±1 (17–24) | 13±1 (10–15) | 4±0,5 (3–5) | 4±0,5 (3–5) |

Примечание: Приведены средние значения и ошибка среднего; в скобках приведены минимальное и максимальное значение за период.

го экологического мониторинга пресноводных экосистем [5, 6]. В ранее проведенных работах показано, что наиболее выраженные изменения в состоянии биоценозов радиоактивно загрязнённых водоёмов регистрируются в зообентосных сообществах [1, 22].

Оценивали численность основных групп и биомассу основных групп. Показатели количественного развития основных групп зообентоса представлены в табл. 13.

Следует отметить отсутствие в пробах зообентоса двусторчатых и брюхоногих мол-

Таблица 12

Общее количественное развитие зоопланктона водоёма В-4
и относительный вклад основных групп, 2016 г.

| Период | Показатель | Значение | Доля отдельных групп, % | | |
|---------------|------------|--------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | | Коловратки | Ветвистоусые ракообразные | Веслоногие ракообразные |
| Начало лета | Ч | 5,2±0,9 (2,9–6,6) | (80–96) | (0,3–7,2) | (2,6–12,1) |
| | Б | 2,3±0,5 (1,8–3,7) | (11–30) | (20–30) | (18–54) |
| Середина лета | Ч | 5,2±2,0 (2,2–10,1) | (77–94) | (0,8–3,3) | (4,7–22,6) |
| | Б | 4,5±2,2 (0,6–9,8) | (8–42) | (21–63) | (27–43) |
| Конец лета | Ч | 4,1±1,5 (1,8–7,2) | (76–94) | (2,3–11,0) | (3–21) |
| | Б | 5,8±2,0 (2,8–9,6) | (11–53) | (36–53) | (7–49) |

Примечание: Ч – численность, тыс./л, Б – биомасса, мг/л; приведены средние значения и ошибка среднего; в скобках указаны минимальное и максимальное значения за период.

Таблица 13

Количественное развитие основных групп зообентоса, 2016 г.

| Период | Показатель | Группы | | | | |
|---------------|------------|----------|---------------------|------------------------|-----------------|------------------|
| | | Mollusca | Chironomidae | Oligocheta | Hirudinea | Ephemeroptera |
| Начало лета | Ч | – | 1000±400 (280–1800) | (80–1120) ¹ | 80 ³ | – |
| | Б | – | 12±4 (3,7–18,4) | (<0,1–1) ¹ | 4 ³ | – |
| Середина лета | Ч | – | 610±160 (160–1160) | 210±110 (120–400) | 40 ³ | 200 ⁴ |
| | Б | – | 11±4 (2,6–27,1) | <0,1 | 2 ³ | 0,9 ⁴ |
| Конец лета | Ч | – | 450±200 (200–840) | (360–400) ² | 80 ³ | – |
| | Б | – | 10±7 (2–24) | <0,1 ² | 2 ³ | – |

Примечание: Ч – численность, экз./м²; Б – биомасса, г/м²; приведены средние значения и ошибка среднего; в скобках указаны минимальное и максимальное значения за период; ¹ на В4/1 и В4/2; ² на В4/2 и В4/4; ³ только на В4/3; ⁴ только на В4/1.

люсков. Преобладание в составе зообентоса водоёма В-4 личинок комаров-звонцов (хируномид) характерно для высокотрофных водоёмов с высоким содержанием биогенных элементов и с низким содержанием растворённого в воде кислорода в летний период. Среди организмов, обитающих на различных субстратах, главным образом, на живых и отмерших макрофитах, отмечены группы, характерные для водоёмов умеренной зоны: личинки стрекоз, фитофильные моллюски рода *Lymnaea*, пиявки Hirudinea.

Согласно РД 52.24.633-2002, угнетение развития отдельных групп бентосных организмов, упрощение гетерогенности, таксономического разнообразия сообщества является признаком экологического регресса.

Характеристика высшей водной растительности. Оценку проводили один раз за сезон. Определяли видовой состав, биомассу, проективное покрытие. Отмечены следующие виды водных и прибрежно-водных растений: рдест блестящий *Potamogeton lucens* L., порохлистник погружённый *Ceratophyllum demersum* L., тростник южный *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steud., рогоз узколистный *Typha angustifolia* L., рогоз Лаксмана *Typha laxmannii* Lepechin; на берегах преобладали крапива двудомная *Urtica dioica* L., папоротник *Polypodiophyta* sp., паслён *Solanum* sp.

Были выделены на водоёме несколько зон с характерным видовым составом и количественным развитием макрофитов:

1. Гелофиты – зона занимает прибрежную область, доминируют тростник и рогоз.

2. Гидрофиты укореняющиеся с плавающими листьями – в основном зона занимает верховья водоёма, постепенно переходя в следующую зону; доминируют роголистник и рдест.

3. Гидрофиты укореняющиеся погружённые – зона представлена теми же видами, но характеризуется меньшим количественным развитием.

4. Открытая вода – отсутствуют массовые разрастания макрофитов, зона занимает большую часть акватории водоёма, ближе к приплотинной области.

Определение площади каждой из зон проводилось путём анализа космических снимков, представленных в открытом доступе. Зона выделялась по визуальным признакам и результатам рекогносцировки, проведённой на водоёме в ходе полевых работ. Затем задавался масштаб, и измерялась площадь. По итогам анализа была

построена карта распределения макрофитов на водоёме В-4 (рис. 7).

В табл. 14 представлена биомасса макрофитов на водоёме В-4.

Как видно из табл. 14, наибольшей сырой массы достигают гидрофиты с плавающими

Таблица 14
Биомасса макрофитов на водоёме В-4, 2016 г.

| Точка отбора | Преобладающая экологическая группа | Сырая масса, кг/м ² | Сухая масса, кг/м ² |
|--------------|---|--------------------------------|--------------------------------|
| В-4/1 | гидрофиты укореняющиеся с плавающими листьями | 3,7±1,2 | 0,24±0,04 |
| В-4/1 | гидрофиты укореняющиеся погружённые | 0,22±0,4 | 0,02±0,01 |
| В-4/2 | гелофиты | 4,1±1,0 | 0,80±0,05 |
| В-4/3 | гелофиты | 3,7±1,6 | 1,3±0,6 |

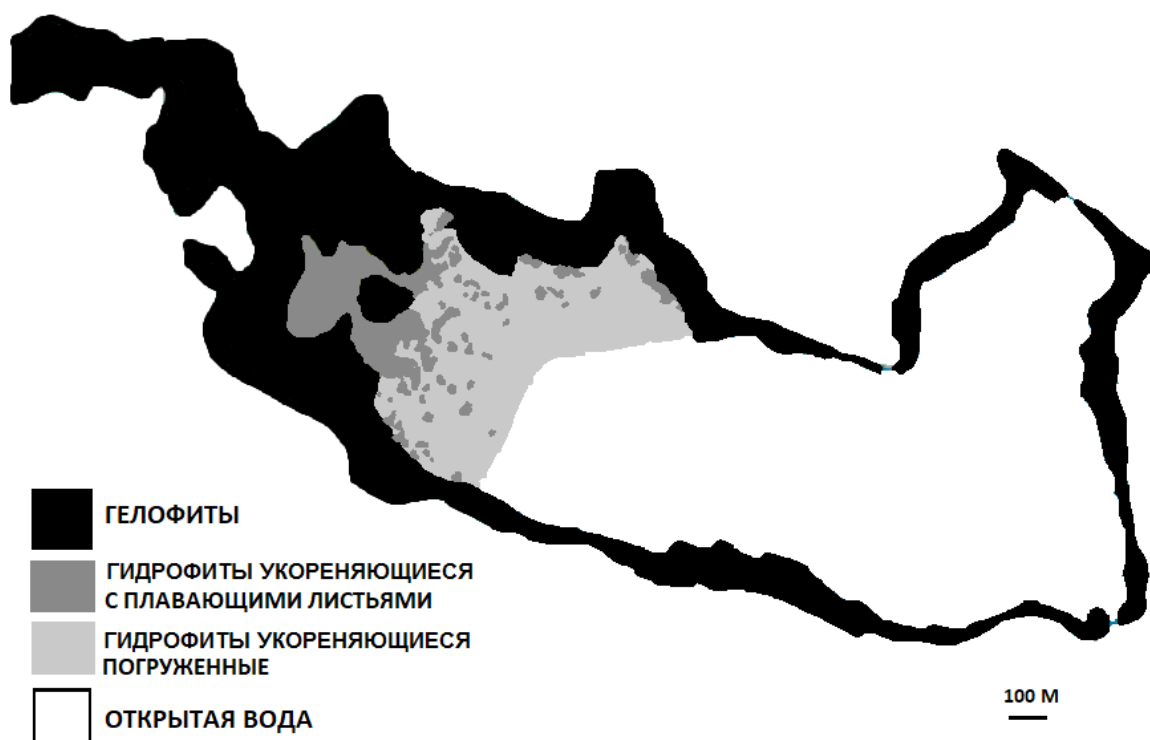


Рис. 7. Схема распределения макрофитов на водоёме В-4

листьями (рдесты, роголистник). Они образуют в верховьях водоёма (в районе станции В-4/1) практически сплошные заросли, местами занимая всю толщу воды от дна до поверхности. При этом продуктивность этой экологической группы невысока, сухая масса — $0,2\text{--}0,27 \text{ кг/м}^2$. Гелофиты (в основном тростник южный, рогоз) обладают более высокой продуктивностью ($0,75\text{--}2,32 \text{ кг сухой массы/м}^2$).

Наименьшей продуктивностью обладают погружённые гидрофиты. Эту экологическую группу образуют те же макрофиты, что и первую, однако не достигшие максимального развития.

По результатам изучения пространственного распределения разных групп макрофитов было установлено, что наибольшую площадь ($0,66 \text{ км}^2$) занимают гелофиты. Они образуют сплошные подвижные сплавины практически по всему периметру водоёма. Под действием ветра значительные участки сплавин могут отрываться от берега и дрейфовать по водоёму, чаще всего по направлению к приплотинной области. Обладая при этом высокой продуктивностью, гелофиты составляют основную часть общей продукции макрофитов — $730\pm 230 \text{ т сухой массы}$.

Гидрофиты с плавающими листьями занимают значительно меньшую площадь ($0,07 \text{ км}^2$) и имеют меньшую продуктивность, таким образом, суммарная их биомасса невелика — $16,3\pm 2,4 \text{ т}$.

Биохимический и цитологический анализ крови плотвы. Рыбы являются высшим трофическим звеном в водных экосистемах и одними из самых радиочувствительных гидробионтов, наблюдается дозозависимое повышение числа эритроцитов и снижение количества эритроцитов в периферической крови плотвы, обитающей в радиоактивно загрязнённых водоёмах [23].

Количество клеток в периферической крови плотвы, гематокрит и концентрации основных ионов приведены в табл. 15. Концентрация глюкозы в периферической крови у плотвы из водоёма В-4 была достоверно ниже значения этого показателя у плотвы из незагрязнённого водоёма сравнения; значение гематокрита, содержание клеток в периферической крови у плотвы из водоёма В-4 также было снижено [24].

Таблица 15

Биохимические показатели периферической крови плотвы из водоёма В-4, 2016 г.

| Показатели | Значения для плотвы водоёма В-4 (среднее и ошибка среднего) |
|--|---|
| Количество клеток в периферической крови, млн/мл | $0,89\pm 0,09$ |
| Na, ммоль/л | $124,5\pm 1,7$ |
| K, ммоль/л | $2,86\pm 0,2$ |
| Cl, ммоль/л | $109,1\pm 1,6$ |
| Глюкоза, ммоль/л | $8,0\pm 0,7$ |
| Гематокрит, % | $15,4\pm 1,9$ |

При подсчёте количества кроветворных клеток в головной части почки было установлено, что у рыб из водоёма В-4 количество таких клеток в среднем составляло 1730 ± 60 в поле зрения $0,92 \text{ мм}^2$. Также было выявлено увеличение количества мелано-макрофагальных центров (ММЦ) (скопление макрофагов, участвующих в иммунном ответе у рыб) в головной части почки у плотвы из водоёма В-4. Средняя площадь, занимаемая ММЦ в почечной ткани, была равна $1800\pm 600 \text{ мкм}^2$, а количество ММЦ составило в среднем $0,24\pm 0,09 \%$ в поле зрения. Наличие визуально детектируемых ММЦ говорит о наличии стрессовых факторов для рыб [25], а наличие гемопоэтических клеток — о функционировании системы кроветворения в головной части почки в условиях повышенного радиационного воздействия на орган [26]. В проведённых ранее исследованиях была выявлена связь между уровнем радиоактивного загрязнения водоёма и увеличением площади ММЦ в почечной ткани рыб [27].

Система специальных наблюдений за состоянием экосистем радиоактивно загрязнённых водоёмов. На основании существующих нормативных документов, регламентирующих государственную систему наблюдения за загрязнением поверхностных вод суши, а также выявленных дозозависимых изменений биологических показателей биоценозов были определены основные показатели, отражающие состояние радиоактивно загрязнённых пресноводных экосистем. Наблюдения в системе

биологического мониторинга должны предусматривать следующие принципы:

а) регулярность и комплексность их проведения. Комплексность наблюдений обеспечивают, проводя наблюдения по гидрохимическим, радиохимическим, спектрометрическим, радиометрическим, дозиметрическим и биологическим показателям;

б) репрезентативность мест отбора проб, что должно учитываться при формировании сети пунктов наблюдений;

в) согласованность программ наблюдения и совпадение сроков отбора проб воды, донных отложений и гидробионтов;

г) обеспечение единства и достоверности измерений при анализе проб воды и донных отложений с использованием аттестованных методик измерений; проведение наблюдений за состоянием биоты на единой методологической основе.

Экологический мониторинг радиоактивно загрязнённых водных объектов подразумевает анализ состояния экосистемы в ряду лет по сравнению с исходным фоновым значением (состояние экосистемы до начала загрязнения) или с состоянием экосистемы водного объекта сравнения. Водоём или водоток сравнения — водный объект, не подверженный радиоактивному загрязнению и сопоставимый с наблюдаемым загрязнённым объектом по морфометрическим и гидрологическим характеристикам.

При необходимости (чрезвычайные ситуации, резкие изменения качества воды, наблюдаемые визуально, массовая гибель гидробионтов и т.п.) могут проводиться специальные наблюдения, цели которых индивидуальны для отдельных случаев и определяют состав выполняемых работ.

Отбор проб для проведения наблюдений за загрязнением водоёмов и водотоков, а также состоянием биоты, проводят в пунктах наблюдений. Формирование сети пунктов наблюдений основано на принципах, используемых при проведении режимных наблюдений за загрязнением объектов природной среды согласно Р 52.24.309-2004 и РД 52.24.353-94. Например, на водоёме В-4 на основе измерения глубин, радиометрических исследований мощности дозы на дне, особенностей распределения высшей водной растительности по акватории водо-

ёма, морфометрических показателей, а также гидрологического режима было сформировано четыре станции отбора проб. На основании полученной информации формируют научно обоснованную схему сети пунктов наблюдений с учётом локальных зон интенсивного загрязнения водных объектов. На незагрязнённых водных объектах или на их участках создаются пункты сравнения.

Мониторинг за состоянием биоты радиоактивно загрязнённых экосистем должен включать определение следующих показателей:

а) определение концентрации основных химических ионов и элементов, способных оказывать влияние на гидробионтов (нитраты, нитриты, фосфаты, сульфаты, хлориды, тяжёлые элементы, БПК, ХПК и др.);

б) определение содержания основных дообразующих радионуклидов в абиотических компонентах экосистемы (вода, донные отложения), а также в организмах гидробионтов основных экологических групп (фитопланктон, зоопланктон, зообентос, ихтиофауна, высшая водная растительность);

в) расчёт мощности поглощённой дозы для основных групп гидробионтов;

г) определение биологических показателей экосистем.

В систему мониторинга должны быть включены перечисленные ниже биологические объекты и характеризующие их показатели.

На организменном и суборганизменном уровне наиболее подходящим объектом является ихтиофауна. Рыбы являются одними из самых чувствительных групп гидробионтов при воздействии широкого спектра неблагоприятных факторов окружающей среды, в том числе и при радиоактивном загрязнении водных экосистем. Среди рыб, обитающих в специальных промышленных водоёмах ФГУП "ПО "Маяк", наиболее показательны параметры крови плотвы. При проведении мониторинга рекомендовано определять количество клеток в периферической крови, гематокрит, содержание в крови глюкозы, количество мелано-макрофагальных центров и гемопоэтических клеток в головной части почки. При отсутствии ихтиофауны данные исследования не проводятся.

На популяционном уровне и уровне сообществ необходимо анализировать состояние

фитопланктона, зоопланктона, зообентоса, перифитона, высшей водной растительности:

- фитопланктон, микроскопические организмы, пассивно передвигающиеся в толще воды и осуществляющие фотосинтез как первое звено трофической цепи водоёма, играет значительную роль в мониторинге пресноводных экосистем. Необходимо определять численность, биомассу и видовой состав фитопланктона;

- зоопланктон, беспозвоночные животные, населяющие толщу воды, играют огромную роль в трансформации энергии и биотическом круговороте веществ, реагируют изменением видового состава и численности на меняющиеся условия среды. Необходимо определять численность, биомассу и видовой состав зоопланктона;

- перифитон, животные и растения, входящие в состав обрастаний на погружённых в воду предметах; благодаря приуроченности к субстрату играют важную роль при оценке качества воды за определённый промежуток времени, предшествующий исследованию. Необходимо определять видовой состав перифитона;

- зообентос, беспозвоночные животные, населяющие дно водоёмов, приуроченные к определённым субстратам и, как правило, малоподвижные, что позволяет использовать эту группу организмов для регистрации воздействия на водные экосистемы. Необходимо определять численность и биомассу основных таксономических групп, видовой состав зообентоса;

- высшая водная растительность, реагирующая на изменения окружающей среды видовым составом, биомассой; изучение проективного покрытия водоёма высшей водной растительностью определяет обоснованное размещение пунктов отбора проб.

Для характеристики функции экосистем необходимо оценивать продукцию и деструкцию органического вещества.

Должна быть установлена следующая периодичность отбора проб:

- фитопланктон, зоопланктон, перифитон, зообентос — не менее одного раза в месяц в летний период, желательно также отбирать пробы однократно весной, осенью и зимой;

- высшая водная растительность, оценка продукции и деструкции органического вещества, показатели крови и гистологические показатели головной части почки у рыб – один раз в летний период;

Для характеристики содержания радионуклидов в донных отложениях достаточно проводить отбор раз в год на всех станциях отбора проб. Измерения содержания радионуклидов в воде нужно проводить параллельно с отбором проб гидробионтов. Сбор гидробионтов для измерения содержания в них радионуклидов – один раз в сезон.

Мониторинг состояния биоты радиоактивно загрязнённых экосистем проводится на единой методологической основе. Отбор, консервацию проб планктона и бентоса, изучение макрофитов, определение в пробах гидробиологических показателей выполняют в соответствии с руководствами [13, 14, 28–31] и РД 52.24.565-96. Обработку ихтиологического материала и отбор крови рыб проводят в соответствии с [32].

Расчёт мощности поглощенной дозы для гидробионтов основных экологических групп проводят с использованием программного комплекса ERICA Tool [12], указывая в программе концентрации радионуклидов, измеренные в воде, донных отложениях и гидробионтах исследуемого водоёма.

Отбор и транспортировку проб гидробионтов радиоактивно загрязнённых водных объектов проводят в соответствии с СП 2.6.6.1168-02; СанПиН 2.6.1.1281-03, анализ проб проводят с учётом требований техники безопасности по СанПиН 2.6.1.2523-09; СП 2.6.1.2612-10.

Комплексную оценку качества воды по гидробиологическим показателям дают в соответствии с ГОСТ 17.1.3.07-82, комплексной экологической классификацией качества поверхностных вод суши [33], руководством по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем [14]. Оценку состояния экосистемы по показателям развития фитопланктонного сообщества проводят согласно РД 52.24.564-96, по показателям зоопланктонного сообщества – согласно РД 52.24.565-96. Уровень антропогенного эвтрофирования за многолетний период оценивают согласно РД 52.24.620. Уровень экологического регресса

за многолетний период оценивают согласно РД 52.24.633.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время производственный мониторинг радиоактивно загрязнённых водоёмов ПО "Маяк" в основном сосредоточен на регулярном ежемесячном определении содержания радионуклидов в воде, определении химического состава воды, количества клеток основных таксономических групп фитопланктона. Однако этой информации недостаточно для оценки состояния биоценозов. Предложена система проведения регулярного методически организованного мониторинга биоты экосистем промышленных водоёмов ФГУП "ПО "Маяк", апробированная на водоёме В-4.

В специальном промышленном водоёме В-4 выявлено характерное для эвтрофных водоёмов значительное развитие цианобактерий в составе фитопланктона. Уровень количественного развития фитопланктона оказался высоким, отмечается выраженное "цветение" воды, воды относятся к 4 классу качества ("загрязнённые") экологической классификации по показателям антропогенного эвтрофирования (РД 52.24.620-2000). Численность зоопланктона изменялась в широких пределах, преобладали по численности коловратки, что является признаками экологического регресса экосистемы. В пробах зообентоса отсутствовали двусторчатые и брюхоногие моллюски. В составе зообентоса водоёма В-4 преобладали личинки комаров-звонцов (хинономид), что характерно для высокотрофных водоёмов с высоким содержанием биогенных элементов.

В соответствии с классификацией эффектов антропогенного воздействия на водные экосистемы (РД 52.24.620-2000) состояние водоёма В-4 может быть определено как антропогенное эвтрофирование. В соответствии с классификацией водных экосистем по уровню экологического регресса (РД 52.24.633-2002) состояние водоёма В-4 характеризуется как экологический регресс, сопровождающийся упрощением трофических цепей в сообществах гидробиоценозов, выпадением крупных систематических групп из состава сообществ зоопланктона, зообентоса, сокращением таксо-

номического разнообразия фитопланктона, зоопланктона, зообентоса, перифитона, колебанием численности фитопланктона и зоопланктона в широких пределах, мощным преобладанием процессов продукции органического вещества над его деструкцией в летний период.

Следует отметить, что для водоёма В-4, среди неблагоприятных факторов среды, кроме высокого содержания радионуклидов, можно назвать органическое загрязнение и повышенное содержание некоторых тяжёлых металлов. Это делает сложным определение причинно-следственных связей между неблагоприятными антропогенными факторами и выявленными экосистемными эффектами. Биологический мониторинг позволяет дать интегральную оценку состояния биоценоза. Для прояснения роли различных факторов, в том числе вклада радиационного воздействия в выявленные экологические эффекты, необходим анализ данных длительных наблюдений о состоянии биоценозов с разными уровнями химического и радиоактивного загрязнения, а также данных лабораторных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pryakhin E.A., Mokrov Y.G., Tryapitsina G.A. et al. Characterization of biocenoses in the storage reservoirs of liquid radioactive wastes of Mayak PA. Initial descriptive report // J. of Environmental Radioactivity. – 2016. – V. 151 (Part 2). – P. 449–460.
2. Environmental protection – the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108 // Annals of the ICRP. – 2008. – V. 38 (4–6). – 242 p.
3. Geras'kin S.A. Ecological effects of exposure to enhanced levels of ionizing radiation // J. of Environmental Radioactivity. – 2016. – V. 162–163. – P. 347–357.
4. Bréchnignac F., Oughton D., Mays C. et al. Addressing ecological effects of radiation on populations and ecosystems to improve protection of the environment against radiation: Agreed statements from a Consensus Symposium // J. of Environmental radioactivity. – 2016. – V. 158–159. – P. 21–29.
5. РД 52.24.309-2016 Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и

- загрязнением поверхностных вод суши. – М.: Росгидромет, ФГБУ "ГХИ", 2016. – 100 с.
6. РД 52.24.633-2002 Методические основы создания и функционирования подсистемы мониторинга экологического регресса пресноводных экосистем. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 32 с.
7. Мокров К.Ю., Мокров Ю.Г. Реконструкция плотности выпадений ^{90}Sr и ^{137}Cs в районе расположения ФГУП "ПО "Маяк" за период 1950–2020 гг. (на примере пос. Новогорный) // Вопросы радиац. безопасности. – 2021. – № 2. – С. 35–45.
8. Орлов О.Л., Смагин А.И., Тарасов О.В. Исследование зоогенного выноса радионуклидов рукокрылыми // Вопросы радиац. безопасности. – 2005. – № 4. – С. 12–20.
9. Экологический паспорт промводоёма В-4 / Каргаполов В.С., Пономарёва Р.П., Солдатов Б.В. и др. – Озёрск: ПО "Маяк", 1997. – 17 с.
10. Методические указания по формализованной комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям. – М.: Росгидромет, 1988. – 8 с.
11. Тряпицына Г.А., Андреев С.С., Осипов Д.И. и др. Оценка уровня радиационного воздействия на гидробионтов некоторых специальных промышленных водоёмов ПО "Маяк" // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2012. – Т. 52. – № 2. – С. 207–214.
12. Environmental risk from ionising contaminants: Assessment and management (ERICA). Deliverable 5. Derivation of predicted-no-effect-dose-rate values for ecosystems (and their suborganisational levels) exposed to radioactive substances / Eds J. Garnier Laplace and R. Gilbin. – Bristol, UK.: Eur Environ. Agency, 2006. – 88 p.
13. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоёмах: Зообентос и его продукция. – Л.: ГосНИОРХ, 1984. – 34 с.
14. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. В.А. Абакумова. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 320 с.
15. Коржевский Д.Э., Гиляров А.В. Основы гистологической техники. Практическое руководство. – М.: Медицина, 2010. – 234 с.
16. Пряхин Е.А., Тряпицына Г.А., Дерябина Л.В. и др. Современное состояние экосистем водоёмов В-11, В-10, В-4, В-17 и В-9 ПО "Маяк" // Вопросы радиац. безопасности. – 2011. – № s2. – С. 5–23.
17. Brown J.E., Alfonso B., Avila R. et al. A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals // J. of Environmental Radioactivity. – 2016. – V. 153. – P. 141–148.
18. Духовная Н.И. Показатели развития фитопланктонных сообществ в водоёмах с разным уровнем радиоактивного загрязнения // Автореф. ... канд биол. наук. – М., 2011. – 24 с.
19. Духовная Н.И., Осипов Д.И., Тряпицына Г.А. и др. Влияние радиоактивного и химического загрязнения водоёмов ПО "Маяк" на состояние фитопланктонных сообществ // Вопросы радиац. безопасности. – 2011. – № s2. – С. 24–36.
20. Осипов Д.И. Характеристика количественного развития и видового разнообразия зоопланктонных сообществ водоёмов с разным уровнем радиоактивного загрязнения // Автореф. ... канд биол. наук. – М., 2011. – 24 с.
21. Осипов Д.И., Тряпицына Г.А., Стяжкина Е.В. и др. Влияние радиоактивного загрязнения на зоопланктон пресных водоёмов // Вопросы радиац. безопасности. – 2011. – № s2. – С. 37–49.
22. Перетыкин А.А., Андреева С.И., Трапезников А.В. и др. Характеристика двусторчатых моллюсков радиоактивно загрязнённых водоёмов ПО "Маяк" и водоёма сравнения – Шершнёвского водохранилища Челябинской области // Вопросы радиац. безопасности. – 2020. – № 1. – С. 21–44.
23. Тряпицына Г.А., Осипов Д.И., Егорейченков Е.А. и др. Оценка состояния эритропозы у плотвы (*Rutilus rutilus*) радиоактивно загрязнённой реки Течи // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2017. – Т. 57. – № 1. – С. 98–107.
24. Организация системы мониторинга биоты экосистем промышленных водоёмов ФГУП "ПО "Маяк": отчёт о НИР (заключ.) / ФГБУН УНПЦ РМ. – Челябинск, 2016. – 41 с.
25. Заботкина Е.А. Влияние токсикантов органической и неорганической природы на структуру мелано-макрофагальных центров у костистых рыб (обзор) // Труды ИБВВ РАН. – 2017. – № 77(80). – С. 20–33.

26. Tiukhai M.V., Pryakhin E.A., Akleyev A.V. The influence of chronic radiation exposure on hematopoiesis in the head kidney of roach (*Rutilus rutilus*) in in situ experiments // *Health physics*. – 2018. – V. 115. – No. 1. – P. 47–48.
27. Тюхай М.В. Оценка площади мелано-макрофагальных центров в головной части почек у плотвы (*Rutilus rutilus*), обитающей в радиоактивно-загрязнённых водоёмах ТКВ ПО "Маяк" // *Радиобиология. От клетки до биосферы: сборник научных тезисов всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, 24 октября 2019 г., г. Челябинск*. – Челябинск, 2019. – С. 53–54.
28. Садчиков А.П. Методы изучения пресноводного фитопланктона. – М.: Университет и школа, 2003. – 157 с.
29. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоёмах: Фитопланктон и его продукция / Под ред. Г.Г. Винберга. – Л.: ГоисНИОРХ, 1984. – 31 с.
30. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоёмах: Зоопланктон и его продукция / Под ред. Г.Г. Винберга. – Л.: ГосНИОРХ, 1982. – 34 с.
31. Разумов А.С. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоёмах: Бактериопланктон и его продукция. – Л.: ГосНИОРХ, 1984. – 22 с.
32. Правдин П.Ф. Руководство по изучению рыб. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 376 с.
33. Оксик О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // *Гидробиологический журнал*. – 1993. – Т. 29. – № 4. – С. 62–77.

RADIATION SAFETY PROBLEMS

Scientific Journal

FEDERAL STATE UNITARY ENTERPRISE "MAYAK" Production Association
State Atomic Energy Corporation Rosatom

№ 2 (106) 2022

CHIEF EDITOR Yu.G. MOKROV

DEPUTY CHIEF EDITOR I.G. TANANAEV

EDITORIAL ADVISORY COMMITTEE

A.V. Akleyev, V.N. Bolshakov, L.A. Bolshov, V.I. Velichkin,
E.A. Demchenko (publ. manager), M.V. Zhukovsky, I.A. Ivanov, L.A. Ilyin,
S.N. Kalmykov, D.N. Kolupaev, N.A. Koshurnikova, A.I. Kryshev, A.A. Kuvaev,
I.I. Linge, M.V. Logunov, B.F. Myasoedov, M.G. Nagornaya, M.I. Pokhlebaev,
E.A. Pryakhin, S.A. Romanov, M.E. Sokolnikov, A.V. Trapeznikov,
S.S. Utkin, A.P. Khomyakov, V.F. Khokhryakov, S.V. Yudintsev

CONTENTS

| | |
|--|----|
| Welcome Letter from Chief Editor | 3 |
| RADIATION SAFETY | |
| Yu.G. Mokrov, K.Yu. Mokrov, T.A. Antonova, Ye.L. Murashova. The Main Results of Radioactive Contamination Control of Surface Water Bodies in the Mayak PA Surveillance Zone in 2021 | 6 |
| Yu.G. Mokrov, N.B. Isayeva, T.A. Yarkova. The Results of Radiation Environment Control in the Territory of the Mayak PA Surveillance Zone in 2021 | 16 |
| G.A. Postovalova. The Results of Groundwater Monitoring in the Production Area of the Mayak PA in 2021 | 25 |
| I.V. Tsivilyov, O.V. Gorlov. The Results of Hydrological Monitoring of the Techa River Cascade of Reservoirs Performed by FSBI Hydrospeztzgeologiya in 2021 | 40 |
| Yu.G. Mokrov, K.Yu. Mokrov, A.Ye. Dementyeva. The Results of Control of Radioactive Emissions into the Atmosphere From Stationary Sources of the Mayak PA in 2021 | 51 |
| Yu.G. Mokrov, A.A. Posokhova, K.Yu. Mokrov. The Results of Monitoring of the Status of Special Industrial Reservoirs of Mayak Facility In 2021 | 58 |

CONTENTS

| | |
|---|----|
| Ye.A. Pryakhin, N.I. Atamanyuk, A.A. Peretykin, M.V. Tyukhay, N.I. Mogil'nikova, Ye.V. Styazhkina, N.A. Obvintseva, S.S. Andreyev, A.Ye. Aldibekova, Yu.G. Mokrov, K.Yu. Mokrov, G.A. Tryapitsyna. Validation of the System Intended for Biological Monitoring of Ecosystems of Industrial Water Bodies of Mayak Production Association Using the Example of Reservoir V-4 | 70 |
|---|----|

| | |
|-----------------|-----------|
| CONTENTS | 91 |
|-----------------|-----------|

| | |
|------------------|-----------|
| ABSTRACTS | 93 |
|------------------|-----------|

| | |
|----------------------------------|-----------|
| Information about Authors | 97 |
|----------------------------------|-----------|

The journal is included in the list of peer-reviewed scientific journals and publications recommended for publication of principal scientific results of Doctoral and Candidate's dissertations.

ABSTRACTS

THE MAIN RESULTS OF RADIOACTIVE CONTAMINATION CONTROL OF SURFACE WATER BODIES IN THE MAYAK PA SURVEILLANCE ZONE IN 2021

Yu.G. Mokrov, K.Yu. Mokrov, T.A. Antonova, Ye.L. Murashova
FSUE Mayak PA, Ozyorsk, Russia

The paper gives a short description of a hydrographic system of the Techa River and provides characteristics of the main water bodies and watercourses located in the vicinity of the Mayak PA. The main parameters of the system designed for monitoring and control of radioactive contamination of water bodies and watercourses in the Mayak PA surveillance zone are presented. The results of radiation control of surface water bodies in 2021 are compared with similar results obtained in 2019–2020. It has been demonstrated that radioactive contamination of the surface water bodies located in the surveillance area is significantly below the intervention level and the reference levels. Radionuclide discharge into the open hydrographic system of the Techa River was about 1 % of the established level of permissible discharge.

KEYWORDS: THE TECHA RIVER, ACTIVITY CONCENTRATION, ^{90}Sr , SEEPAGE, WATER AND RADIOACTIVE RUNOFF

THE RESULTS OF RADIATION ENVIRONMENT CONTROL IN THE TERRITORY OF THE MAYAK PA SURVEILLANCE ZONE IN 2021

Yu.G. Mokrov, N.B. Isayeva, T.A. Yarkova
FSUE Mayak PA, Ozyorsk, Russia

The paper provides the results of control of atmosphere, soil and vegetation contamination with ^{137}Cs , ^{90}Sr and plutonium isotopes ($^{239,240}\text{Pu}$ and ^{238}Pu) obtained in 2021 by the Mayak PA and Roshydromet experts in the vicinity of the Mayak PA. Activity concentration of ^{137}Cs and ^{90}Sr and activity concentration of $^{239,240}\text{Pu}$ and ^{238}Pu in the atmospheric surface layer in the Mayak PA surveillance zone are reported to be 6–7 and 3–5 orders of magnitude lower than the established sanitary standards, respectively. It has been previously shown that the observed intra-annual (monthly average) variation of the activity concentration in the atmosphere (up to 10 times) is due to relatively high and extremely non-uniform radioactive contamination of the soil in the Mayak PA territory and a large number of fugitive combined natural and man-made sources of radioactive releases associated with deflation and wind transfer of radioactive dust at building and construction, agricultural and/or remediation activities, as well as at fires and fire outbreaks in the earlier contaminated territories (1957 and 1967 accidents). It has been demonstrated that the radiation situation in the vicinity of the Mayak PA is stable and the monitoring data obtained in 2021 are in agreement with similar measurement data for the previous years and confirm the regularities identified before.

KEYWORDS: MONITORING, ACTIVITY CONCENTRATION, ATMOSPHERE, AEROSOL, FALLOUTS, ^{90}Sr , ^{137}Cs , PLUTONIUM, DEFLATION, RADIOACTIVE CONTAMINATION OF SOIL AND VEGETATION

THE RESULTS OF GROUNDWATER MONITORING IN THE PRODUCTION AREA OF THE MAYAK PA IN 2021

G.A. Postovalova
FSUE Mayak PA, Ozyorsk, Russia

The paper describes the system of groundwater monitoring in the area affected by the Mayak PA and summarizes the results of observations performed in 2021 as part of routine radiation control. Based on the maps created, scales and dynamics of development of contaminant plumes in the local groundwater were determined. It was established that areas of large man-made contamination formed within the boundaries of water bodies V-9 and V-17 remained stable in 2021 as development of the contaminant plumes was hindered by such factors as depletion of contamination sources and, consequently, reduction in gross inflow of the contaminants into the aquifer, and counteraction of counter currents preventing the contaminant plumes from spreading southwards.

KEYWORDS: CONTAMINATION MONITORING, GROUNDWATER, ^{90}Sr , SULFATE-ION, NITRATES, KARACHAY LAKE, TECHA RIVER CASCADE OF RESERVOIRS

THE RESULTS OF HYDROLOGICAL MONITORING OF THE TECHA RIVER CASCADE OF RESERVOIRS PERFORMED BY FSBI HYDROSPETZGEOLOGIYA IN 2021

I.V. Tsivilov, O.V. Gorlov
Party 10 of Hydrogeological Expedition 30, Branch of FSBI Hydrospeztzgeologiya, Moscow, Russia

The Techa Cascade of Reservoirs (TCR) is a nuclear site; a storage area for liquid radioactive waste (LRW); a complex combined natural and man-made hydrotechnical system consisting of four surface water bodies located in the Techa River valley; a system of dams, bypass channels and various hydraulic structures. For development and implementation of scientific and practical measures aimed at long-term safe use of the Techa Cascade of Reservoirs it is necessary to perform integrated hydrological, hydrogeologic and radiation monitoring of all TCR sites. The paper presents the results of hydrological and hydrochemical observations at surface watercourses in the TCR area and at water bodies located within the boundaries of the Mayak PA surveillance area performed in 2021 by the experts of FSBI Hydrospeztzgeologiya. Objectives, tasks, scope and frequency of observations are discussed in the paper, as well as the main results, identified patterns and trends. It has been demonstrated that the monitoring data allow estimating the efficiency of retaining hydraulic structures at the right-bank and left-bank channels designed for reduction of seepage of contaminants from the TCR into the Techa River. It has been shown that the monitoring data serve as a reliable basis for mathematical modeling of the state of surface water and groundwater and for justified prediction of long-term safe use of the TCR as a site for storage of special radioactive waste.

KEYWORDS: HYDROLOGICAL MONITORING, TECHA CASCADE OF RESERVOIRS, HYDROGRAPHIC SYSTEM, LEVEL-CONTROLLER, LIQUID RADIOACTIVE WASTE, RADIOACTIVE CONTAMINATION, ^{90}Sr , SULFATE-ION, SAFETY

THE RESULTS OF CONTROL OF RADIOACTIVE EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE FROM STATIONARY SOURCES OF THE MAYAK PA IN 2021

Yu.G. Mokrov, K.Yu. Mokrov, A.Ye. Dementyeva
FSUE Mayak PA, Ozyorsk, Russia

According to the inventory count performed in 2018, there were 31 high sources of emissions registered at the Mayak PA that emit 28 radioactive substances into the atmosphere and 382 low sources of emissions

that release 9 radioactive substances. The paper provides the results of control of radioactive emissions into the atmosphere from the Mayak PA stacks in 2021 as compared with the established maximum permissible emission levels. It should be noted that the maximum permissible emission levels are scientifically grounded and include permissible emission levels, as well as reference emission levels. For the permissible emissions, radiation exposure to the population of the surveillance zone and to the facility personnel was estimated. It is concluded that current radionuclide emissions from all stationary sources of emissions do not affect significantly the radiation situation in the vicinity of the Mayak PA, remain stable and tend to decline, and radiation exposure to the residents of the populated areas that are nearest to the Mayak PA does not exceed 5 $\mu\text{Sv/year}$ (0.5 % of the maximum effective dose to the population established in Radiation Safety Standards NRB-99/2009).

KEYWORDS: EMISSION SOURCE, RADIONUCLIDE, ATMOSPHERE, ACTIVITY CONCENTRATION, PERMISSIBLE EMISSION, EFFECTIVE DOSE, POPULATION

THE RESULTS OF MONITORING OF THE STATUS OF SPECIAL INDUSTRIAL RESERVOIRS OF MAYAK FACILITY IN 2021

Yu.G. Mokrov, A.A. Posokhova, K.Yu. Mokrov
FSUE Mayak PA, Ozyorsk, Russia

The paper deals with the results of hydrological control of the status of surface reservoirs for storage of liquid radioactive waste (SSRLRW) of Federal State Unitary Enterprise Mayak Production Association during low-water period of 2016–2021. It is demonstrated that in 2021 water levels significantly (0.4–0.5 m) decreased practically in all SSRLRW. On a number of occasions, water feed was necessary to maintain routine water levels of the reservoirs. The authors analyze data on radionuclide and chemical composition of water in SSRLRW obtained within the last few years. It is shown that in 2021 content of contaminating agents remained stable in all reservoirs, and no dangerous tendencies and trends were registered.

KEYWORDS: LIQUID RADIOACTIVE WASTE, TECHA RESERVOIR CASCADE, SURFACE RESERVOIRS FOR STORAGE OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE, WATER LEVEL

VALIDATION OF THE SYSTEM INTENDED FOR BIOLOGICAL MONITORING OF ECOSYSTEMS OF INDUSTRIAL WATER BODIES OF MAYAK PRODUCTION ASSOCIATION USING THE EXAMPLE OF RESERVOIR V-4

**Ye.A. Pryakhin¹, N.I. Atamanyuk¹, A.A. Peretykin¹, M.V. Tyukhay¹, N.I. Mogil'nikova¹,
Ye.V. Styazhkina^{1,2}, N.A. Obvintseva¹, S.S. Andreyev¹, A.Ye. Aldibekova¹, Yu.G. Mokrov³,
K.Yu. Mokrov³, G.A. Tryapitsyna^{1,2}**

¹FSBIS Urals Research Center for Radiation Medicine of FMBA of Russia, Chelyabinsk, Russia

²FSBEI HE Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

³FSUE Mayak PA, Ozyorsk, Russia

Achieving an acceptable level of anthropogenic impact on ecosystems and biosphere is one of important problems of our time. A system of radiation protection of freshwater ecosystems based on biocenotic effects has not been developed to date. A system of biological monitoring was proposed based on the analysis of the dose-dependent effects identified in the special industrial reservoirs of the Mayak PA at the organismal, population and community levels. This system involves regular assessment and

analysis of the state of freshwater biocenoses based on the main dose-forming radionuclide concentrations in the abiotic and biotic components of the ecosystem, estimation of dose rates for the main groups of aquatic organisms, analysis of the state of biocenoses in terms of phytoplankton, zooplankton, zoobenthos, higher aquatic plants, and ichthyofauna. The proposed system complements the industrial environmental monitoring of the Mayak PA and allows solving both scientific and practical problems.

KEYWORDS: TECHA CASCADE OF RESERVOIRS, V-4 POND, BIOLOGICAL MONITORING, BIOCENOSIS, PHYTOPLANKTON, ZOOPLANKTON, ZOOBENTHOS, FISH FAUNA, CHRONIC RADIATION EXPOSURE

Главный редактор

Мокров Юрий Геннадьевич — доктор технических наук

Заместитель главного редактора

Тананаев Иван Гундарович — доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН

Редакционная коллегия:

Аклеев Александр Васильевич — доктор медицинских наук, профессор
Большаков Владимир Николаевич — доктор биологических наук, профессор, академик РАН
Большов Леонид Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН
Величкин Василий Иванович — доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент РАН
Демченко Елена Александровна — кандидат химических наук
Жуковский Михаил Владимирович — доктор технических наук, профессор
Иванов Иван Александрович — кандидат технических наук
Ильин Леонид Андреевич — доктор медицинских наук, профессор, академик РАН
Калмыков Степан Николаевич — доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН
Колупаев Дмитрий Никифорович — кандидат технических наук
Кошурникова Нина Александровна — доктор медицинских наук, профессор
Крышев Александр Иванович — доктор биологических наук
Куваев Андрей Алексеевич — доктор геолого-минералогических наук, доцент
Линге Игорь Иннокентьевич — доктор технических наук
Логунов Михаил Васильевич — кандидат технических наук
Мясоедов Борис Федорович — доктор химических наук, профессор, академик РАН
Нагорная Марина Григорьевна — кандидат технических наук
Похлебаев Михаил Иванович — доктор биологических наук, профессор
Пряхин Евгений Александрович — кандидат биологических наук
Романов Сергей Анатольевич — доктор медицинских наук
Сокольников Михаил Эдуардович — доктор биологических наук
Трапезников Александр Викторович — доктор технических наук
Уткин Сергей Сергеевич — доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН
Хомяков Анатолий Павлович — доктор биологических наук, профессор
Хохряков Валентин Федорович — доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН
Юдинцев Сергей Владимирович — доктор биологических наук, профессор

Сведения об авторах статей:

- | | |
|---------------------------------|---|
| Алдибекова Альбина Есжановна | – старший инженер экспериментального отдела УНПЦ РМ, т. (351) 2327924, albinaes@gmail.com |
| Андреев Сергей Сергеевич | – к.б.н., ведущий инженер экспериментального отдела УНПЦ РМ, т. (351) 2327924, andreevsss@mail.ru |
| Антонова Татьяна Аркадьевна | – инженер-технолог лаборатории экологической безопасности и охраны окружающей среды ЦЗЛ, т. (35130) 33292, cpl@po-mayak.ru |
| Атаманюк Наталья Игоревна | – к.б.н., старший научный сотрудник экспериментального отдела УНПЦ РМ, доцент кафедры радиационной биологии ЧелГУ, т. (351) 2327924, vita_pulhra@mail.ru |
| Горлов Олег Васильевич | – ведущий гидрогеолог обособленного подразделения Партия № 10 Филиала ФГБУ "Гидроспецгеология" "Гидрогеологическая экспедиция № 30", т. (35130) 36927, ggp-10@mail.ru |
| Дементьева Анна Евгеньевна | – инженер-технолог лаборатории экологической безопасности и охраны окружающей среды ЦЗЛ, т. (35130) 37152, cpl@po-mayak.ru |
| Исаева Наталья Борисова | – инженер-исследователь лаборатории экологической безопасности и охраны окружающей среды ЦЗЛ, т. (35130) 33747, cpl@po-mayak.ru |
| Могильникова Наталья Игоревна | – младший научный сотрудник экспериментального отдела ФГБУН УНПЦ РМ ФМБА России, т. (351) 2327924, al_tary@mail.ru |
| Мокров Кирилл Юрьевич | – начальник группы лаборатории экологической безопасности и охраны окружающей среды ЦЗЛ, т. (35130) 37154, cpl@po-mayak.ru |
| Мокров Юрий Геннадьевич | – д.т.н., советник генерального директора по науке и экологии, т. (35130) 33304, mokrov@po-mayak.ru |
| Мурашова Екатерина Леонидовна | – начальник группы лаборатории ядерно-физических методов анализа ЦЗЛ, т. (35130) 33354, cpl@po-mayak.ru |
| Обвинцева Надежда Александровна | – научный сотрудник экспериментального отдела УНПЦ РМ, т. (351) 2327924, n_obvintseva@mail.ru |
| Перетыкин Андрей Анатольевич | – старший инженер экспериментального отдела УНПЦ РМ, т. (351) 2327924, engineer_eo@mail.ru |
| Посохова Анна Александровна | – инженер-исследователь лаборатории экологической безопасности и охраны окружающей среды ЦЗЛ, т. (35130) 33747, cpl@po-mayak.ru |
| Постовалова Галина Адильшаевна | – гидрогеолог лаборатории экологической безопасности и охраны окружающей среды ЦЗЛ, т. (35130) 37092, cpl@po-mayak.ru |

- Пряхин Евгений Александрович – д.б.н., профессор, заведующий экспериментальным отделом
ФГБУН УНПЦ РМ, т. (351) 2327925, *pryakhin@urcrm.ru*
- Стяжкина Елена Владимировна – к.б.н., старший научный сотрудник экспериментального отдела
УНПЦ РМ, доцент кафедры радиационной биологии ЧелГУ,
т. (351) 2327924, *yelena-st@mail.ru*
- Тряпицына Галина Александровна – д.б.н., ведущий научный сотрудник экспериментального отдела
УНПЦ РМ, профессор кафедры радиационной биологии ЧелГУ,
т. (351) 2327925, *tga28@mail.ru*
- Тюхай Максим Викторович – младший научный сотрудник экспериментального отдела ФГБУН
УНПЦ РМ ФМБА России, т. (351) 2327924, *mvtioukhai@mail.ru*
- Цивилёв Игорь Викторович – начальник обособленного подразделения Партия № 10 Филиала
ФГБУ "Гидроспецгеология" "Гидрогеологическая экспедиция
№ 30", т. (35130) 36927, *ggp-10@mail.ru*
- Яркова Татьяна Александровна – начальник группы лаборатории экологической безопасности и
охраны окружающей среды ЦЗЛ, т. (35130) 37471, *cpl@po-mayak.ru*

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
Федерального государственного унитарного предприятия
"ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "МАЯК"
ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
№ 2 (106) 2022

Технический редактор И.Н. Моисеева

Переводчики: О.А. Константинова, Е.В. Лупеха, Д.Ю. Сезонова

Корректоры: О.А. Константинова, Е.В. Лупеха, Д.Ю. Сезонова

ПОДПИСКА – 2022

**С апреля 2022 г. на сайте "Почта России" проводится
подписная кампания на июль - декабрь 2022 года
по электронному каталогу.**

ЖУРНАЛ

"Вопросы радиационной безопасности"

основной индекс ПН083.

Учредитель: Федеральное государственное унитарное предприятие "Производственное объединение "Маяк"
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-21316 от 22 июня 2005 г. выдано Федеральной
службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
Адрес издателя: Россия, 456780, Челябинская обл., г. Озёрск, ул. Ленина, 31
Адрес редакции: Россия, 456780, Челябинская обл., г. Озёрск, ул. Ермолаева, 18
Тел. (35130) 33081; e-mail: vrb@cpl.po-mayak.ru
Address: 18, Ermolayev st., Ozyorsk, 456780, Russia
Tel. (35130) 33081; e-mail: vrb@cpl.po-mayak.ru

Подписано в печать 30.06.2022

Выход в свет 01.07.2022

Тираж 65 экз.

Цена договорная

Отпечатано в полиграфическом участке ФГУП "ПО "Маяк"
Россия, 456780, Челябинская обл., г. Озёрск, ул. Ленина, 40