ТРАЕКТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ — ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА, ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 1 (1) 2022

Роль ядерной энергии в расширении топливо-энергетической базы и сохранении климата

Защищенность подземных вод от глубинного источника загрязнения при отработке уранового месторождения Добровольного сернокислотным скважинным подземным выщелачиванием

Временна́я изменчивость реакций растений в условиях хронического облучения: возможные подходы к оценке адаптации к абиотическому стрессу

СОДЕРЖАНИЕ

От главного редактора **Ярмошенко И.В.**..... 4

Роль ядерной энергии в расширении топливно-энергетической базы и сохранении климата **Щеклеин С.Е.**..... 5

Результаты опытных операций по временному отключению системы охлаждения в емкостях-хранилищах радиоактивных суспензий **Старовойтов Н.П., Казаков В.А., Абдулвагидов Р.Э., Дудкин В.А., Козлов П.В., Мирошниченко А.А., Кустов С.В.** 16

Защищенность подземных вод от глубинного источника загрязнения при отработке уранового месторождения Добровольного сернокислотным скважинным подземным выщелачиванием (Курганская область) **Солодов И.Н.**..... 26

Временна́я изменчивость реакций растений в условиях хронического облучения: возможные подходы к оценке адаптации к абиотическому стрессу **Антонова Е.В., Шималина Н.С., Позолотина В.Н.** 39

Облучение населения за счет выбросов радиоактивных веществ АО «ГНЦ НИИАР» в 2020 г. **Авдонина А.Б., Кизин В.Д.** 54

Ускорительная масс-спектрометрия для биомедицинских приложений (краткий обзор) **Пархомчук Е.В., Петрожицкий А.В., Игнатов М.М., Кулешов Д.В., Калинкин П.Н., Прокопьева Е.А., Кутнякова Л.А., Пархомчук В.В.** 61

Направления исследований ТРИНИТИ в рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» **Марков Д.В., Ильин К.И.**..... 78

Обоснование метода оценки поступления трития в атмосферу при охлаждении воды в брызгальных бассейнах Ростовской АЭС **Екидин А.А., Антонов К.Л., Васянович М.Е., Пышкина М.Д., Меркулов А.Ф., Фоменко П.А.** 86

Формирование общественного мнения в интересах развития и признания атомной энергетики экологически чистым источником энергии **Горин Н.В., Екидин А.А., Кучинов В.П., Матвеева Л.Г., Меньшиков В.Ф.** 102

Ускорительная масс-спектрометрия для обнаружения сверхнизких концентраций вирусных частиц меченных радиоуглеродом **Прокопьева Е.А., Пархомчук Е.В.** 112

ТРАЕКТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ – ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА, ТЕХНОЛОГИИ
№ 1 (1) 2022

Главный редактор:
И. В. Ярмошенко

Выпускающий редактор:
А. В. Васильев

Макетирование и компьютерная верстка:
А. В. Васильев,
Е. И. Назаров

Адрес редакции:
620990, г. Екатеринбург, ИПЭ УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 20

Тел.: (343) 374-37-71
E-mail: iie@ecko.uran.ru
www.restrajectory.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 27 апреля 2022 г., Эл№ ФС77-83207

Учредитель
ИПЭ УрО РАН

Перепечатка материалов, опубликованных в журнале, возможна только с разрешения редакции.

ТРАЕКТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ – ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА, ТЕХНОЛОГИИ

№ 1 (1) 2022

Главный редактор

Ярмошенко Илья Владимирович, к.ф.-м.н., директор Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Заместитель главного редактора

Васильев Алексей Владимирович, к.т.н., заведующий лабораторией Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Редакционная коллегия

Вараксин Анатолий Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Веселкин Денис Васильевич, д.б.н., заведующий лабораторией Института экологии растений и животных УрО РАН (г. Екатеринбург)

Екидин Алексей Акимович, к.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Захаров Вячеслав Иосифович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

Иванов Владимир Юрьевич, к.ф-м.н., директор института Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

Крышев Александр Иванович, д.б.н., заведующий лабораторией Научно-производственного объединения «Тайфун» Росгидромета (г. Обнинск)

Марков Дмитрий Владимирович, д.т.н., директор АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» (г. Троицк)

Микляев Петр Сергеевич, д.г.-м.н., профессор РАН, главный научный сотрудник Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (г. Москва)

Сюрдо Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург)

Талалай Александр Григорьевич, д.г.-м.н., профессор, заведующий кафедрой Уральского государственного горного университета (г. Екатеринбург)

Тузанкина Ирина Александровна, заслуженный деятель науки РФ, д.м.н., профессор, Институт иммунологии и физиологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Юрков Анатолий Константинович, к.г.-м.н., заведующий лабораторией Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН (г. Екатеринбург)

ОТ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

И.В. Ярмошенко

Уважаемые коллеги, мы рады предложить вашему вниманию первый номер нового междисциплинарного научного журнала.

Принципиальная задача нашего журнала – отразить широчайший спектр направлений исследований взаимодействия человека, природы и технологий, демонстрирующего сложную траекторию, в том числе, уходящую за горизонт предсказуемости. Мы надеемся, что в нашем журнале вы увидите научные статьи и материалы, представляющие разнообразие естественных наук. Уверены, что новые знания, рожденные в рамках междисциплинарного подхода, будут востребованы не только для решения актуальных практических задач защиты окружающей среды и обеспечения экологической безопасности, но и для готовности общества к будущим вызовам.

Мы рады, что в число членов редакционной коллегии вошли ведущие действующие ученые, воплотившие в своих исследованиях яркие примеры синергии различных дисциплин.

В первый номер журнала включены материалы докладов, прозвучавших на V Всероссийской научно-практической конференции «Биосферная совместимость атомной энергетики». Представленные авторами статьи посвящены перспективным технологиям обеспечения безопасности атомной энергетики, радиационной безопасности, радиоэкологии, проблемам ядерной медицины, популяризации знаний в инженерно-технической и радиационно-гигиенической сферах.

Приглашаем коллег к совместной работе над следующими выпусками журнала!

Основные темы журнала:

- Экологическая безопасность энергетики.
- Биосферная совместимость современных технологий.
- Экологическая безопасность урбанизированной среды.
- Приборы и методы контроля и мониторинга состояния окружающей среды.
- Математическое моделирование в биологии и медицине.
- Моделирование сложных многокомпонентных систем.
- Эколого-климатические исследования.
- Устойчивое развитие и экологический менеджмент.

УДК 621.039

РОЛЬ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ В РАСШИРЕНИИ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БАЗЫ И СОХРАНЕНИИ КЛИМАТА

С. Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

В статье приведено расчетное обоснование концепции расширения топливно-энергетической базы и снижения объемов эмиссии парниковых газов при совместном использовании органического и ядерного топлива в структуре гибридных атомно-тепловых электростанций. Показано, что технологическая схема (выработка насыщенного пара в ядерной паропроизводящей установке (ЯППУ), а затем перегрев до максимально достигнутых в теплоэнергетике параметров за счет органического топлива) приводит к снижению удельных расхода газового топлива на производство электрической энергии на 25–30 %, выбросов продуктов сгорания в 2,5 раза (по сравнению с ТЭС), потребления технической воды (по сравнению с АЭС) – в 1,5 раза. Указывается на возможность расширения топливной базы современной ядерной энергетики с реакторами на тепловых нейтронах путем использования освоенных (реакторы бридеры) и перспективных (гибридные термоядерные реакторы) технологий. Коренное достоинство рассмотренного комплекса – ЯППУ-ТЭС – его реализуемость в короткий период времени со значительным снижением углеродного следа в единице произведенной энергии, что является важным условием устойчивого роста энергетического производства при сохранении экологического равновесия в геосфере.

Ключевые слова: органическое топливо, ядерное топливо, перегрев, продукты сгорания, экология, бридеры, гибридные термоядерные реакторы

В XXI в. становятся все более очевидными следующие проблемы, угрожающие устойчивости существования нашей цивилизации:

- недостаточность топливно-энергетических ресурсов для обеспечения все возрастающих потребностей в энергии даже на ближайшие десятилетия;
- аномально высокий и все возрастающий уровень воздействия энергетики и транспорта на атмосферу, гидросферу и биосферу, приводящий к негативным климатическим изменениям;
- наметившаяся во многих регионах мира тенденция к возникновению дефицита пресной воды.

Становится все более ясным, что существующие и вновь создаваемые альтернативные технологии топливообеспечения и производства тепловой и электрической энергии не способны решить эти проблемы, будучи обособленными. Решения следует искать на пути совместного (синергетического) использования всей суммы знаний и технических достижений, имеющихся во всех отраслях энергетики. Перечислим их:

Атомная энергетика:

- создание и доведение до высокого уровня надежности и эффективности водоохлаждаемых паропроизводящих установок типа ВВЭР (PWR) и АЭС на их основе [1];

– создание и многолетняя валидация АЭС с реакторами на быстрых нейтронах типа БН, способных в ближайшей перспективе обеспечить бридинг (вовлечение в топливный цикл атомной энергетики урана-238 и ОЯТ реакторов ВВЭР), что создает основы замыкания ядерного топливного цикла (ЗТЦ) и многократно расширяет топливную базу атомной энергетики для всех типов реакторов [2];

– решение основных теоретических проблем создания нового поколения реакторов бридеров типа БРС с более высокой эффективностью бридинга [3];

– успехи в создании установок управляемого термоядерного синтеза – источника нейтронов для нереакторного бридинга, что открывает возможность наработки плутония-239 для существующих АЭС всех типов (ВВЭР, БН, БРС и др.) [4].

Тепловая энергетика:

– создание и доведение до высокого уровня надежности и эффективности ТЭС, работающих на сверхкритических параметрах пара, обеспечивающих КПД свыше 40 %;

– создание и валидация ТЭС, работающих на суперсверхкритических параметрах пара (USC), обеспечивающих КПД до 50 %;

– создание и доведение до высокого уровня надежности и эффективности ТЭС, работающих по комбинированному парогазовому циклу (ПГУ), способных обеспечить КПД свыше 55 %, минимальный расход органического топлива, технической воды и выход продуктов сгорания.

Возобновляемая энергетика:

– создание доведение до высокого уровня надежности и эффективности крупных ГЭС, способных генерировать высокую мощность и осуществлять суточное и сезонное регулирование энергопроизводства в соответствии с изменением объемов (графиков) энергопотребления;

– создание и промышленное освоение крупных и малых фотоэлектрических станций, способных к максимальному энергопроизводству в пиковые (дневные) часы энергопотребления;

– разработка и промышленное освоение крупных и малых ветроэлектрических установок с единичной мощностью агрегатов выше 10 МВт и создание на их основе ВЭС гигаватного класса.

В данной работе рассматривается возможность решения перечисленных в начале статьи проблем с использованием уже полностью освоенных технологий атомной и тепловой энергетики. Делается попытка преодоления современных температурных ограничений АЭС с легководными реакторами [5].

Структурная схема энергетической системы гибридного типа приведена на рис. 1.

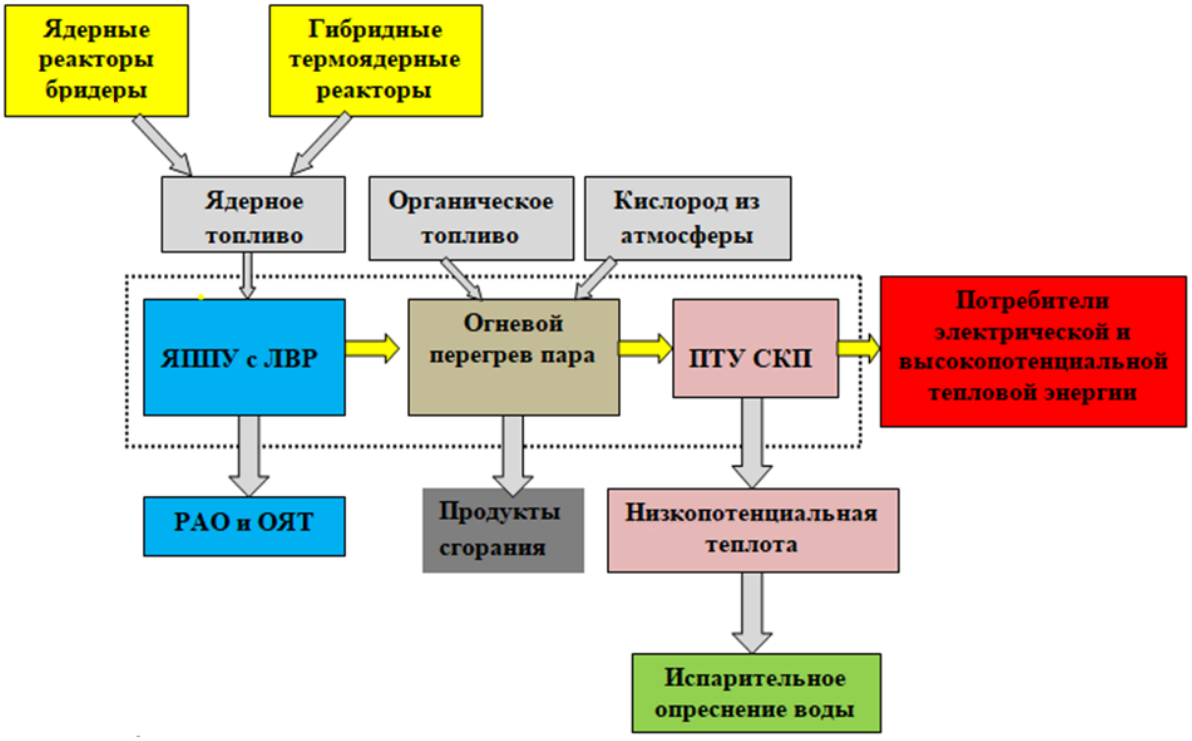


Рисунок 1. Схема энергетической системы гибридного типа

В этой схеме ядерная паропроизводящая установка (ЯППУ) АЭС, включающая реактор, парогенератор и другое оборудование 1-го контура, генерирует насыщенный пар, который далее поступает в котел-пароперегреватель, обогреваемый органическим топливом. Способы повышения КПД цикла путем перегрева пара успешно использовались на кипящих реакторах канального типа АМБ (Россия) и корпусного типа «Гроссвальцгейм» (ФРГ), но не получили дальнейшего развития главным образом из-за необходимости применять высокотемпературные стали, снижающие эффективность использования уранового топлива в реакторах на тепловых нейтронах. Применение неядерного огневого перегрева пара в 60–70-х гг. на АЭС «Индиан-Пойнт-1», «Элк-Ривер» (США), «Линген» (ФРГ) было вынужденной мерой борьбы с большой влажностью пара в турбинах, вызывающей трудности при их эксплуатации вследствие низких начальных параметров генерируемого пара [6].

Уровень термодинамических параметров пара современных АЭС существенно выше, как и экологические требования к современным ТЭС. В связи с этим возникает интерес к анализу возможностей синергетического использования ТЭС и АЭС.

В данной работе при помощи пакета United Cycle [7, 8], предназначенного для решения задач определения наилучших структуры и состава оборудования теплоэнергетического объекта и расчета стационарных эксплуатационных режимов работы, выполнен анализ эффективности экологического воздействия гибридной атомно-тепловой электростанции на базе ЯППУ Российского проекта АЭС с реактором ВВЭР-1200. Пакет United Cycle отличает:

- высокая степень детализации тепловой схемы моделируемого объекта;
- выверенные и отлаженные в течение многолетней эксплуатации модели элементов оборудования;
- высокая точность сведения материального и теплового баланса;

- многоуровневая система тестирования на каждом шаге создания модели, расчета и анализа результатов режимов работы;
- высокоразвитая графическая среда разработки и визуализации результатов.

Выполнено моделирование трех вариантов АТЭС:

1 – проектный цикл К-1200-6,8/50 для АЭС с реактором ВВЭР-1200;
2 – цикл с начальным перегревом и одной ступенью промперегрева;
3 – цикл с компрессией, перегревом и двумя ступенями промперегрева.

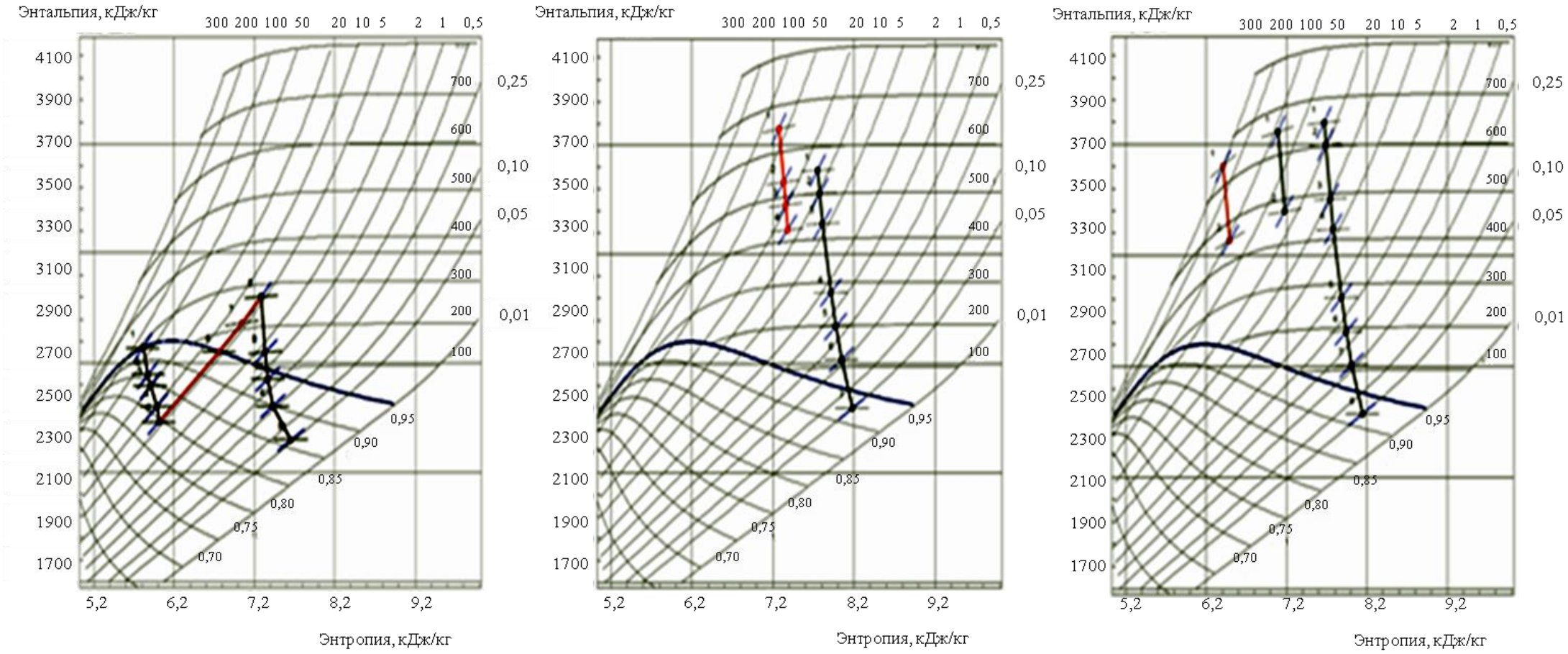
Первый вариант основан на принятых проектных решениях с использованием паровой турбины, работающей на насыщенном паре, генерируемом в парогенераторе АЭС. Второй вариант предполагает использование огневого перегрева насыщенного пара (за счет газового топлива) без изменения давления пара в котле-пароперегревателе и в промежуточном пароперегревателе. Третий вариант предполагает компрессию и огневой перегрев пара до уровня суперсверхкритических параметров, достигнутого в современной тепловой энергетике (30 МПа, 650 °С), с двумя ступенями промежуточного перегрева.

Термодинамические диаграммы данных циклов приведены на рис. 2. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Интегральные характеристики результатов расчета

Тип электростанции	АЭС ВВЭР - 1200	АТЭС с ЯППУ и начальным перегревом пара	АТЭС с ЯППУ, начальной компрессией и перегревом пара
Параметры	Значения		
Расход насыщенного пара, кг/с	1 794,86	1 794,86	1 794,86
Тепловая мощность, подводимая к рабочему телу в ПГ, МВт	3 210,34	3 242,91	3 240,75
Суммарная тепловая мощность котла, МВт	0	2 255,44	2 375,10
Расход газа в котле, м3/с	0	65,26	68,72
Мощность компрессора, МВт	0	0	717,86
Электрическая мощность ПТУ (брутто), МВт	1 162,52	2 359,35	2 476,65
Электрическая мощность ПТУ (нетто), МВт	1 140,97	2 336,54	2 453,72
КПД цикла (брутто), %	36,21	42,91	44,10
КПД цикла (нетто), %	35,54	42,50	43,69
Доля ЯППУ в производстве энергии, %	100	59	58
Углеродоемкость производства энергии, гр/кВт*ч	0	150	160

В качестве примера на рис. 3 приведена расчетная тепловая схема одного из вариантов.



а б в

Рисунок 2. h-S диаграммы вариантов АЭС и АТЭС: а – проектный цикл К-1200-6,8/50 для АЭС с реактором ВВЭР-1200, б – цикл с начальным перегревом + 1 ст. промперегрева, в – цикл с компрессией и перегревом + 2 ст. промперегрева

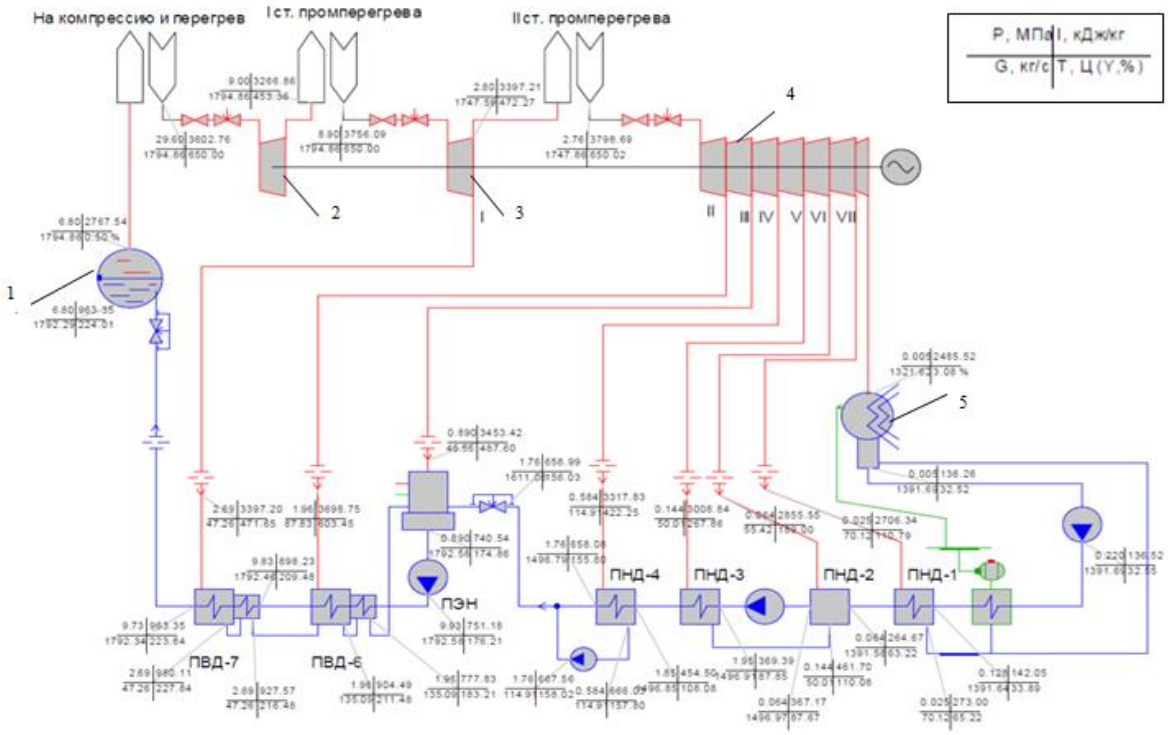


Рисунок 3. Расчетная тепловая схема цикла с начальной компрессией и перегревом и двумя ступенями промперегрева пара: 1 – парогенератор ЯППУ; 2 – ЦВД; 3 – ЦСД; 4 – ЦНД; 5 – конденсатор пара ПТУ

На рис. 4 а,б,в приведены характеристики базового (ВВЭР-1200) и модифицированных вариантов АТЭС на основе базового варианта.

Из приведенных данных следует, что использование насыщенного пара, производимого ЯППУ для дальнейшего перегрева органическим топливом, позволяет значительно повысить электрическую мощность и повысить КПД комплекса, при существенном снижении удельного расхода органического топлива.

Для сравнения приведем характеристики Пермской ГРЭС (таблица 2), имеющей значение электрической мощности – 2400 МВт с турбинами К-800-240-5 на сверхкритические параметры пара (ТЭС СКП), основное и резервное топливо которой природный газ.

Таблица 2. Характеристики Пермской ГРЭС по данным годового отчета за 2013 г. [9]

Параметры	Значения
Выработка электроэнергии, млн кВт·ч	15 819,835
Отпуск тепла, тыс. Гкал	291,848
КИУМ, %	75,25
Расход топлива, Газ, млн м^3	4 083,75
Углеродоемкость производства энергии, гр/кВт*ч	400

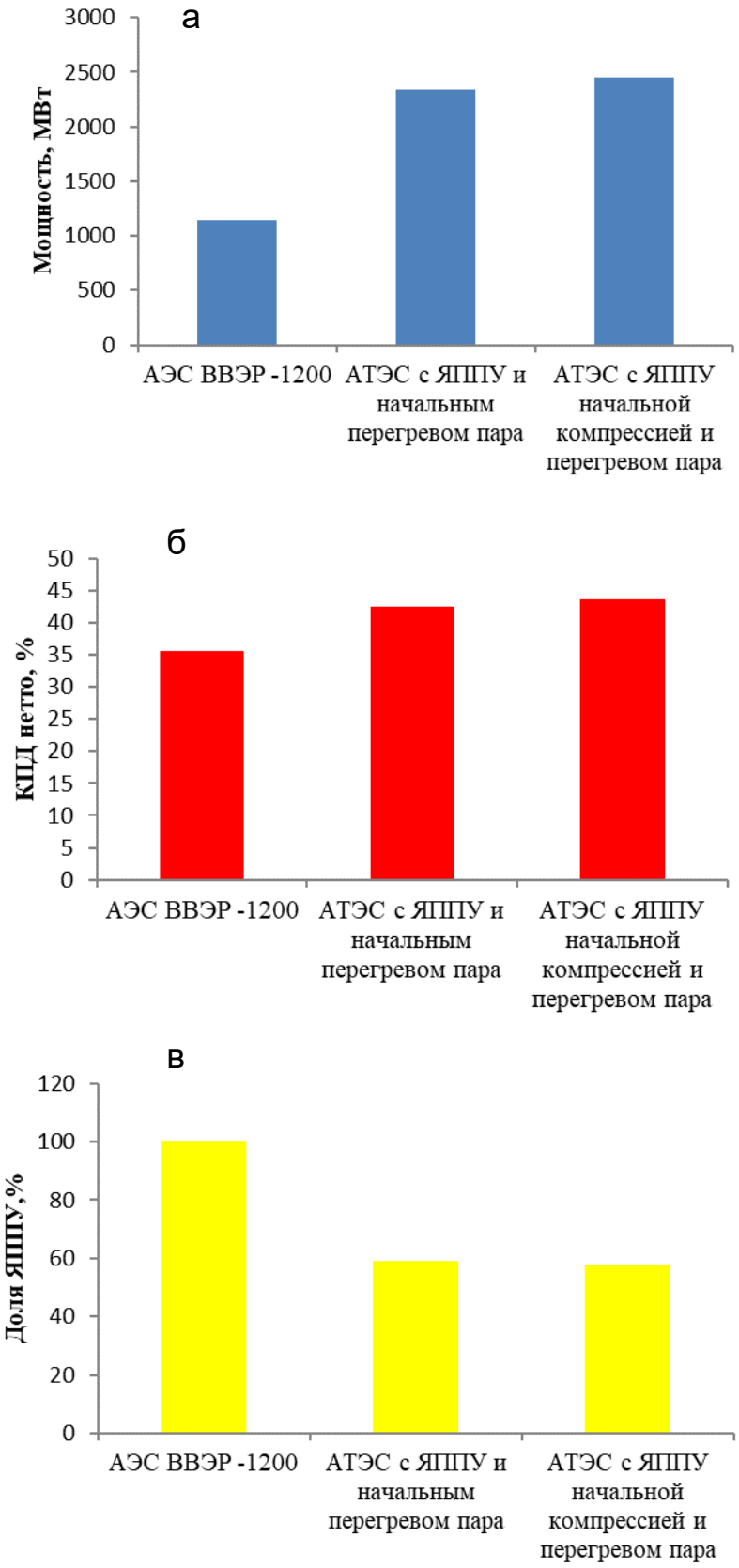


Рисунок 4. Сравнительные характеристики базового и модифицированных вариантов: а – мощность, б – КПД, в – доля ЯППУ

На рис. 5 приведены сравнительные характеристики ТЭС, АЭС и АТЭС, а также данные по углеродоемкости производства энергии на новом парогазовом блоке Пермской ГРЭС.

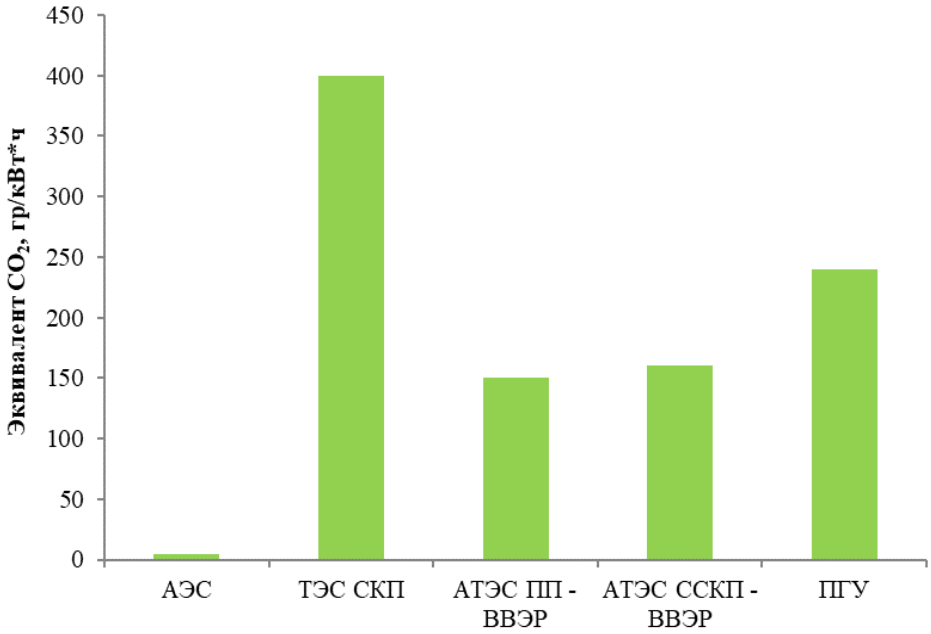


Рисунок 5. Удельная эмиссия парниковых газов в зависимости от типа электростанции

Очевидно, что повышение параметров пара и снижение расхода органического топлива на единицу произведенной энергии приводят к снижению выхода продуктов сгорания, в т. ч газов представляющих опасность повышения парникового эффекта, что радикально повышает экологическую толерантность использования органического топлива на ТЭС.

Подобная технологическая схема (выработка пара на АЭС, а затем перегрев до максимально достигнутых в теплоэнергетике параметров за счет органического топлива) становится еще более привлекательной при использовании ЯППУ, способных генерировать пар высоких параметров (БН, БРС, СВБР, ВТГР) [10,11].

Заключение

Современный уровень развития крупномасштабных энергетических станций в Российской Федерации и в мире характеризуется:

- высокими мощностями и уровнем надежности АЭС с легководными ядерными реакторами на тепловых нейтронах типа ВВЭР;
- выдающимися достижениями по освоению АЭС с реакторами бридерами на быстрых нейтронах типа БН;
- освоением в тепловой энергетике ТЭС, работающих на закритических и суперсверхкритических параметрах пара (недоступных для современных АЭС).

Единственный реальный путь радикального снижения экологических нагрузок от энергетических объектов в обозримой перспективе – это создание гибридной энергетики на основе освоенных технологий ВВЭР с использованием неядерного огневого перегрева пара до параметров современных ТЭС и восполнения ядерного топлива путем использования реакторов бридеров (БН, БРС), а в будущем гибридных термоядерных реакторов.

Электростанции, реализующие такие циклы, – это пример сочетания свойств АЭС и ТЭС. По сравнению с обычной АЭС они обладают более высоким КПД, меньшей величиной удельных капиталовложений, а по сравнению с обычной ТЭС – меньшим потреблением топлива, меньшими выбросами продуктов сгорания, а также меньшей величиной топливной составляющей себестоимости энергии.

Если сравнить варианты реализации данной технологии на основе использования реактора ВВЭР-1200, то можно сказать, что с термодинамической, экологической и экономической точек зрения очевидно, что создание АЭС с огневым перегревом пара (без дополнительной компрессии) является приоритетным решением.

Коренное достоинство рассмотренного комплекса – ЯППУ-ТЭС – его реализуемость в короткий период времени со значительным снижением углеродного следа в единице произведенной энергии, что является важным условием устойчивого роста энергетического производства при сохранении экологического равновесия в геосфере.

Список литературы

1. Головной блок нового поколения - особенности проекта ВВЭР-1200 / В. Г. Асмолов, И. Н. Гусев, В. Р. Казанский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 5-21.
2. Пономарев-Степной, Н. Н. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым ядерным топливным циклом на основе БН и ВВЭР / Н. Н. Пономарев-Степной // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 4. С. 183-190.
3. Адамов, Е. О. Ядерная энергетика - вызовы и решение проблем / Е. О. Адамов, Д. С. Соловьев // Энергетическая политика. 2017. № 3. С. 21-30.
4. Велихов, Е. П. Заметки о будущем ядерной энергетики / Е. П. Велихов, В. Д. Давиденко, В. Ф. Цибульский // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. № 1. С. 5-14.
5. Щепетина, Т. Д. О повышении КПД энергоблоков с водо-водяными реакторами (ВВР) / Т. Д. Щепетина // Энергия: экономика, техника, экология. 2010. № 12. С. 21-29.
6. Тепловые схемы ТЭС и АЭС/В. М. Боровков, О. И. Демидов, С. А. Казаров и др.; Под ред. С. А. Казарова. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение. 1995. 392 с.
7. Репозиторий java-библиотеки TCSimulation [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://github.com/ZharovVV/tcsimulation. (15.01.2020)
8. Лафоре Р. Структуры данных и алгоритмы в Java. Классика Computer Science. 2-е изд. СПб.: Питер. 2017. 704 с.: ил. (Серия «Классика computer science»).
9. Годовой отчет по результатам работы за 2013 год. ОАО «ИНТЕР РАО-Электрогенерация»
10. Kostarev V. S., Shirmanov I. A., Anikin A. A., Shcheklein S. E. On the possibility of obtaining ultra-supercritical steam parameters at Nuclear Power Plants with fast neutron reactors using non-nuclear steam superheating. 2021 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1089 012005
11. О применении компрессии и неядерного перегрева пара на реакторах на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем для повышения термодинамической эффективности цикла турбоустановки / И. А. Ширманов, В. С. Костарев, Д. Н. Литвинов, С. Е. Щеклеин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2021. – Т. 64. – № 2-2(759). С. 171-177.

Сведения об авторе:

Щеклеин Сергей Евгеньевич, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, доктор технических наук, профессор, s.e.shcheklein@urfu.ru

THE ROLE OF NUCLEAR ENERGY IN EXPANDING THE FUEL AND ENERGY BASE AND THE CLIMATE PRESERVING

S. E. Shcheklein

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

The article provides an estimated substantiation of the concept of expanding the fuel and energy base and reducing the volume of greenhouse gas emissions with the joint use of fossil and nuclear fuel in the hybrid nuclear-thermal power plants. It is shown that the technological scheme (the production of saturated steam in a nuclear steam-producing plant - NPPU, and then overheating to the maximum achieved parameters in the thermal power industry applying the fossil fuel) leads to a decrease in the specific consumption of gas fuel for the production of electrical energy by 25-30%, emissions of combustion products by 2.5 times (compared to thermal power plants), consumption of industrial water (compared to nuclear power plants) - by 1.5 times. It is indicated that it is possible to expand the fuel base of modern nuclear energy with thermal neutron reactors through the use of technologies mastered (breeder reactors) and promising (hybrid thermonuclear reactors). The fundamental advantage of the considered JPPP-TPP complex is feasibility in a short period of time with a significant reduction in the carbon footprint per unit of energy produced, which is an important condition for the sustainable growth of energy production while maintaining the ecological balance in the geosphere.

Key words: organic fuel, nuclear fuel, overheating, combustion products, ecology, breeder, hybrid thermonuclear reactors.

References

1. Asmolov V.G., Gusev I.N., Kazanskij V.R., Povarov V.P., Stacura D.B. New generation first of the kind unit – VVER 1200 design features. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernaya energetika. 2017. № 3. P. 5-21. (In Russian).
2. Ponomarev-Stepnoi N.N. Two-Component Nuclear Power System with a Closed Nuclear Fuel Cycle Based on BN and VVER Reactors. At Energy 120, P. 233–239 (2016).
3. Adamov E.O., Solov'ev D.S. Nuclear power industry: challenges and problem solution. Energeticheskaya politika. 2017. № 3. P. 21-30. (In Russian).
4. Velihov E.P., Davidenko V.D., Cibul'skij V.F. Some thoughts on nuclear energy future. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyj sintez. 2019. T. 42. № 1. P. 5-14. (In Russian).

5. Shchepetina T. D. On improving the efficiency of power units with water-water reactors (VVER). Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. 2010. №12. P. 21-29. (In Russian).
6. Teplovye skhemy TES i AES. V. M. Borovkov, O. I. Demidov, S. A. Kazarov i dr.; Pod red. S. A. Kazarova. - SPb.: Energoatomizdat. Sankt-Peterburgskoe otdelenie. 1995. P. 392. (In Russian).
7. TCP Simulation java library repository [Electronic resource]. Access mode: URL: https://github.com/ZharovVV/tcsimulation. (15.01.2020)
8. Lafore R. Data Structures and Algorithms in Java. Classika Computer Science. 2nd edition. – SPb.: Piter. 2017. 704 p. (In Russian).
9. Annual report on the results of work for 2013. OJSC INTER RAO-Electrogeneratsiya (Godovoj otchet po rezul'tatam raboty za 2013 god. OAO «INTER RAO-Elektrogeneraciya») (In Russian).
10. Kostarev V.S., Shirmanov I.A., Anikin A.A., Shcheklein S.E. On the possibility of obtaining ultra-supercritical steam parameters at Nuclear Power Plants with fast neutron reactors using non-nuclear steam superheating. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1089 012005
11. Shirmanov I.A., Kostarev V.S., Litvinov D.N., Shcheklein S.E. O primenenii kompressii i neyadernogo peregreva para dlya reaktorov na bystryh nejtronah so svincovym teplonositelem dlya povysheniya termodinamicheskoj effektivnosti cikla turboustanovki. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika. 2021. T. 64. № S2-2 (759). P. 171-177.

УДК 542.61:621.039

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПО ВРЕМЕННОМУ ОТКЛЮЧЕНИЮ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ В ЕМКОСТЯХ-ХРАНИЛИЩАХ РАДИОАКТИВНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Н. П. Старовойтов, В. А. Казаков, Р.Э. Абдулвагидов, В. А. Дудкин, П. В. Козлов, А. А. Мирошниченко, С.В. Кустов

ФГУП «ПО «Маяк», г. Озёрск, Россия

В 2012 г. были проведены опытные операции по временному отключению системы охлаждения на четырех охлаждаемых емкостях-хранилищах радиоактивных суспензий с целью приведения их в более стабильное и безопасное состояние. В данной работе показано, что отключение охлаждения емкостей, приводящее к повышению температуры осадков и перераспределению по всему объему (распульповка), позволяет увеличить скорость выхода (растворения) соединений металлов и их радионуклидов из осадка. Как следствие этих действий – снижение высоты осадка до стабильных значений. Для емкостей-хранилищ № 9 и № 12 высота осадка составила 2,9 м. Для емкостей-хранилищ № 10 и № 11 составила 2,0 м и 2,2 м соответственно. Растворение осадков прошло в большей степени за счет их разогрева. Данные 2020 г. показали, что высота осадков остается стабильной либо уменьшается. Однако для оценки безопасности необходимо учитывать инерционность системы при возобновлении охлаждения. На основании проведенной работы сделан вывод, что емкости-хранилища радиоактивных суспензий находятся во взрывопожаробезопасном состоянии. В то же время следует отметить, что дальнейшее проведение процесса выщелачивания путем введения дополнительных объемов щелочи в емкости-хранилища крайне нежелательно и может рассматриваться только в крайних случаях.

Ключевые слова: радиоактивные материалы, хранение, суспензия, осадок, охлаждение, разогрев

1. Введение

Особую проблему на ФГУП «ПО «Маяк» представляют емкости-хранилища высокоактивных пульп, образовавшихся в результате применения осадительных технологий при переработке облученного топлива ядерных реакторов, которые активно функционировали в 1968–1986 гг. Несмотря на то, что в емкостях-хранилищах имеются системы контроля уровня, давления, температуры и газовыделения, дальнейшее хранение ВАО в емкостях-хранилищах неприемлемо [1].

Емкости-хранилища представляют собой самостоятельные изолированные друг от друга бетонные отсеки размером 9,5×19,5 м и высотой 7 м, облицованные нержавеющей сталью толщиной 3 мм. В комплексе находится 14 емкостей, шесть из них дополнительно оборудованы системами охлаждения: каждая имеет четыре змеевика для охлаждения суспензий, установленных вертикально. Схема охлаждаемых емкостей-хранилищ представлена на рис.1.

При длительном хранении радиоактивных суспензий, в которых нерастворимые соединения металлов и их радионуклидов равномерно распределены в жидкой дисперсной среде, происходит уплотнение. Осветленные маточные растворы (декантаты) или растворы осадительной технологии, из которых извлекли целевой компонент, в процессе хранения возвращают на

переработку, а освободившийся объем вновь заполняют высокоактивными суспензиями. Процессы приема, отстаивания и возврата декантатов в каждой емкости-хранилище повторялись многократно до накопления регламентированной активности бета-излучающих радионуклидов или слоя осадка определенной высоты.

Особенностью хранения суспензий является расслаивание содержимого емкостей с постепенным накоплением и уплотнением осадка на дне, что изменяет теплофизический режим их эксплуатации. Основное количество активности локализуют на себе осадки. Мощность экспозиционной дозы и объемная активность бета-излучающих радионуклидов в осветленных растворах в емкостях-хранилищах значительно (на 1–2 порядка) меньше, чем в уплотненных осадках.

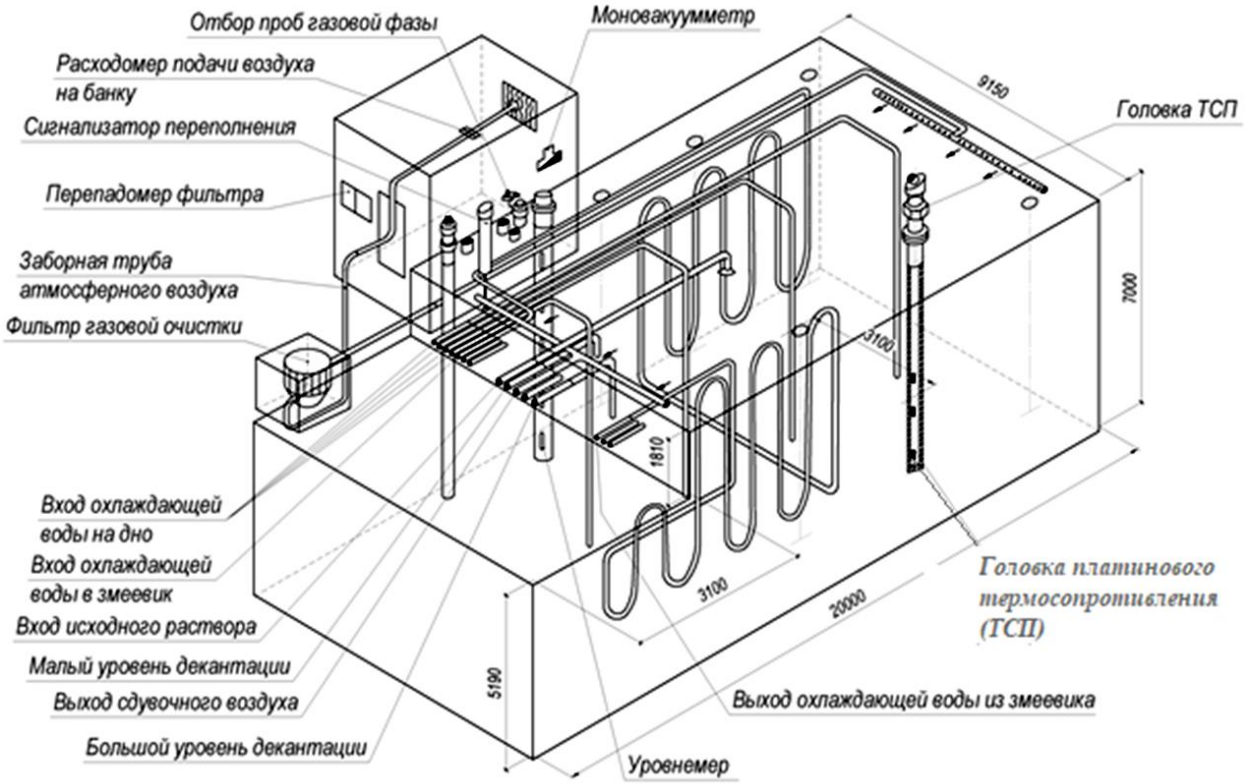


Рисунок 1. Схема охлаждаемых емкостей-хранилищ

В результате уплотнения осадков при длительном хранении одновременно с увеличением объемной активности снижается их подвижность, что приводит к значительному увеличению донных температур вследствие замедления конвективных потоков. Увеличение температуры в донных слоях уплотненного осадка сверх регламентного значения имело место в 1986 г. в неохлаждаемых емкостях.

Для улучшения условий теплопередачи и стабилизации температурного режима хранения суспензий по рекомендациям специалистов центральной заводской лаборатории (далее – ЦЗЛ) в емкостях-хранилищах проведена обработка осадка концентрированным раствором гидроксида натрия. После подачи гидроксида натрия на дно, под слой осадка, в зоны с повышенными температурами, произошло разрыхление плотных слоев суспензии вследствие растворения одного из основных компонентов осадка – амфотерного гидроксида алюминия, а также частичное разложение ферроцианидного комплекса и выход радионуклида цезия-137 в раствор [2].

Щелочная обработка суспензий привела к снижению температуры во всех зонах контроля, в т. ч. и на дне емкостей-хранилищ, уменьшилась также высота слоя плотного осадка.

Основу осадков составляют гидроксиды железа, никеля, хрома, сульфиды железа и никеля, ферроцианиды никеля-цезия и титана-цезия. Жидкая фаза представляет собой высокоминерализованные растворы, химический состав которых обусловлен преимущественно нитратом натрия, гидроксидом натрия, алюминатом натрия и нитритом натрия.

Радионуклидный состав отходов представлен преимущественно продуктами деления. Активность растворной части на 99,9 % определяется радионуклидом цезий-137. Активность осадка обусловлена радионуклидами цезия, стронция, плутония и америция [3].

2. Материалы и методы

С мая 2006 по 2010 г. охлаждаемые емкости-хранилища № 9–12 были подвергнуты распульповке путем обработки плотных осадков раствором гидроксида натрия с целью их перевода в более безопасное подвижное состояние. Исходя из анализа результатов замеров высоты плотного слоя осадка, полученных в октябре 2010 г., был сделан вывод, что процессы распульповки в охлаждаемых емкостях-хранилищах прошли не полностью из-за недостаточной температуры, при которой в щелочной среде происходит процесс растворения осадка. Поэтому считалось, что отключение охлаждения емкостей, приводящее к некоторому безопасному повышению температуры осадков, должно быть полезным для увеличения скорости их растворения.

Несмотря на сходство технологических параметров емкостей-хранилищ, распределение активности по высоте емкостей, кинетика растворения осадков и распределение температуры по донным зонам имеют различный характер. Указанная особенность связана с заполнением емкостей разнородными по своему составу и активности суспензиями.

Следовательно, длительность выдержки охлаждаемых емкостей-хранилищ при отключенных системах охлаждения будет зависеть от скорости разогрева содержимого каждой отдельной емкости.

В соответствии с рекомендацией ЦЗЛ по определению условий безопасной эксплуатации емкостей-хранилищ при временном отключении их систем охлаждения в 2012 г. были проведены опытные операции по временному отключению системы охлаждения на емкостях-хранилищах № 9–12.

Экспериментальная работа была необходима для выяснения значений скорости разогрева содержимого каждой отдельной охлаждаемой емкости-хранилища при отключенной системе охлаждения для оптимизации режима охлаждения.

Опытные операции по отключению системы охлаждения емкостей проводились по следующей схеме:

1. Перекрывалась подача воды на охлаждение емкостей-хранилищ № 9–12.

2. При приближении к значению температуры 95 °С в любой из зон возобновляли подачу воды в систему охлаждения данной емкости заблаговременно, с учетом инерционности системы, и после снижения температуры до 80 °С вновь отключали охлаждение.

3. В конце года возобновили подачу воды в систему охлаждения емкостей-хранилищ и продолжили их эксплуатацию согласно требованиям технологического регламента.

4. В каждой из исследуемых емкостей-хранилищ провели измерения высоты слоя плотного осадка грузиком массой 40 г после включения охлаждения.

3. Результаты работы и их обсуждение

Охлаждение емкостей-хранилищ № 9–12 отключили 12 января 2012 г. Эта дата была принята за начало эксперимента. В течение эксперимента подача воды в систему охлаждения возобновлялась на емкостях следующим образом. В емкости № 9 при достижении температуры 88 °С в 8-й зоне на отметке 0,15 м от дна 6 ноября было восстановлено охлаждение с расходом 12 м^3/ч и отключено 26 ноября после установления максимальной температуры 76,5 °С. В емкости № 10 при достижении температуры 87,9 °С в 5-й зоне на отметке 0,15 м от дна и температуры 87,8 °С в 1-й зоне на отметке 1,5 м от дна 6 июля было восстановлено охлаждение с расходом 13 м^3/ч и отключено 7 августа после установления максимальной температуры 77 °С. Затем, 11 октября, была снова восстановлена подача воды в систему охлаждения при достижении температуры 89 °С в 6-й зоне на отметке 0,15 м от дна и отключена 26 ноября после установления максимальной температуры 79 °С. В емкости № 11 при достижении температуры 87,3 °С в 1-й зоне на отметке 0,15 м от дна 14 августа и температуры 87,9 °С в 8-й зоне на отметке 1,5 м от дна было восстановлено охлаждение с расходом 12 м^3/ч и отключено 19 сентября после установления максимальной температуры 78 °С. В емкости № 12 при достижении температуры 87,8 °С во 2-й зоне на отметке 1,5 м от дна 14 августа было восстановлено охлаждение с расходом 12 м^3/ч и отключено 11 сентября после установления максимальной температуры 79 °С.

Таким образом, время выдержки емкостей без охлаждения в течение 2012 г. составило для емкости № 9 – 333 суток, для № 10 – 287 суток, для № 11 – 329 суток, для № 12 – 337 суток.

Схема расположения термопар на емкостях по зонам приведена на рис. 2.

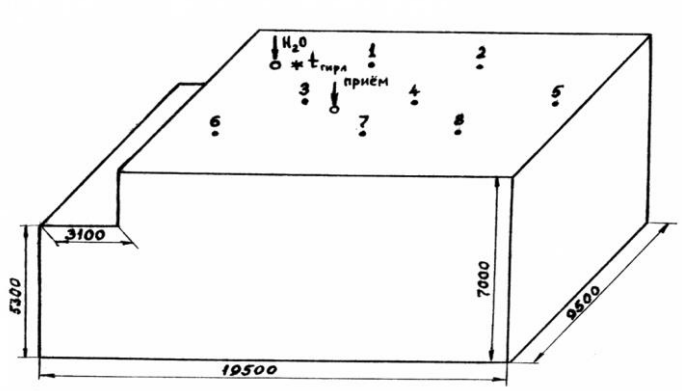


Рисунок 2. Схема расположения термопар на емкостях по зонам 1–8

Во время эксперимента отключение охлаждения не влияло на разрежение в емкостях, которое составляло от 0,9 до 1,2 кПа и косвенно свидетельствовало об отсутствии бурного газовыделения из-за возможного локального кипения в осадке.

Динамика роста температуры определялась по показаниям термометров во всех зонах с периодичностью пять дней при отключенной системе охлаждения.

На рис. 3–6 приведены полученные графики зависимости изменения температур осадков в наиболее горячих зонах на отметках 0,15 и 1,5 м от дна для емкостей № 9–12 после начала эксперимента в зависимости от времени.

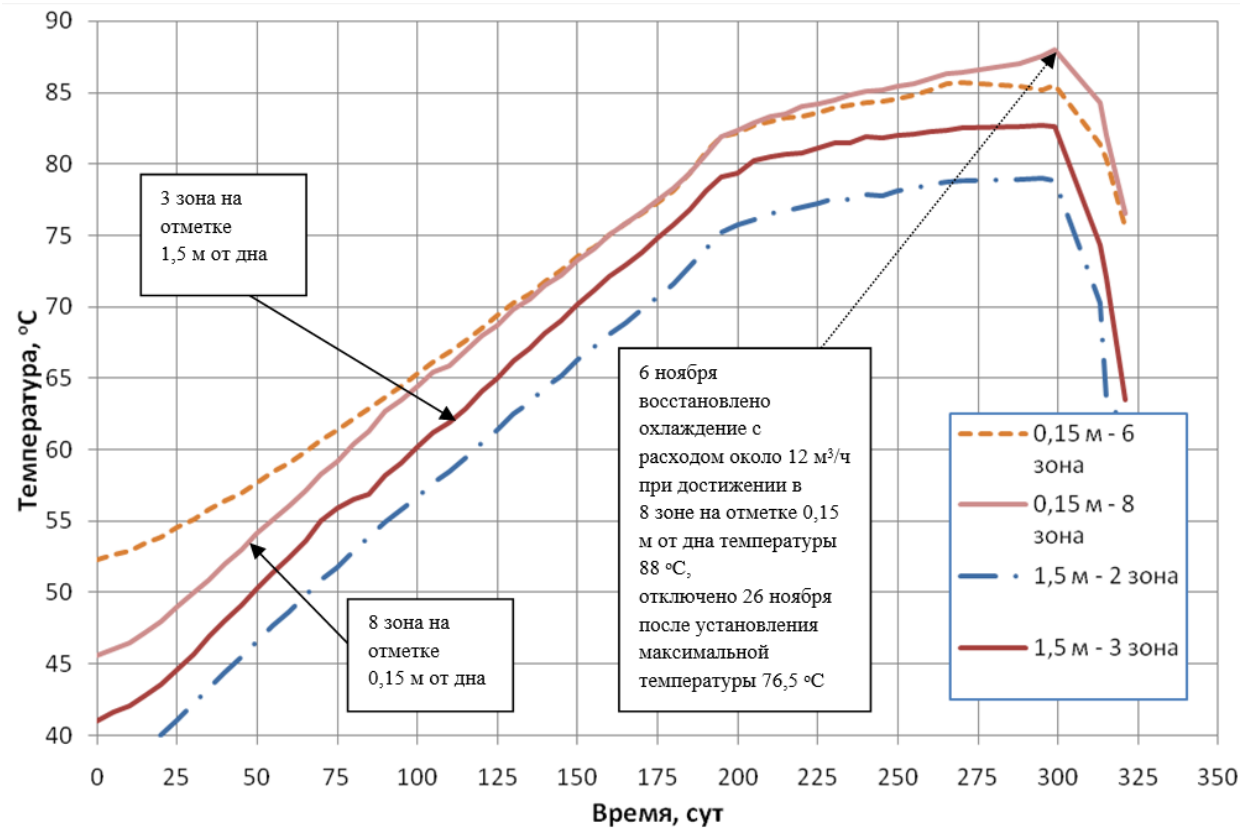


Рисунок 3. График зависимости изменения температур осадков в самых горячих зонах в емкости № 9 от времени в течение эксперимента

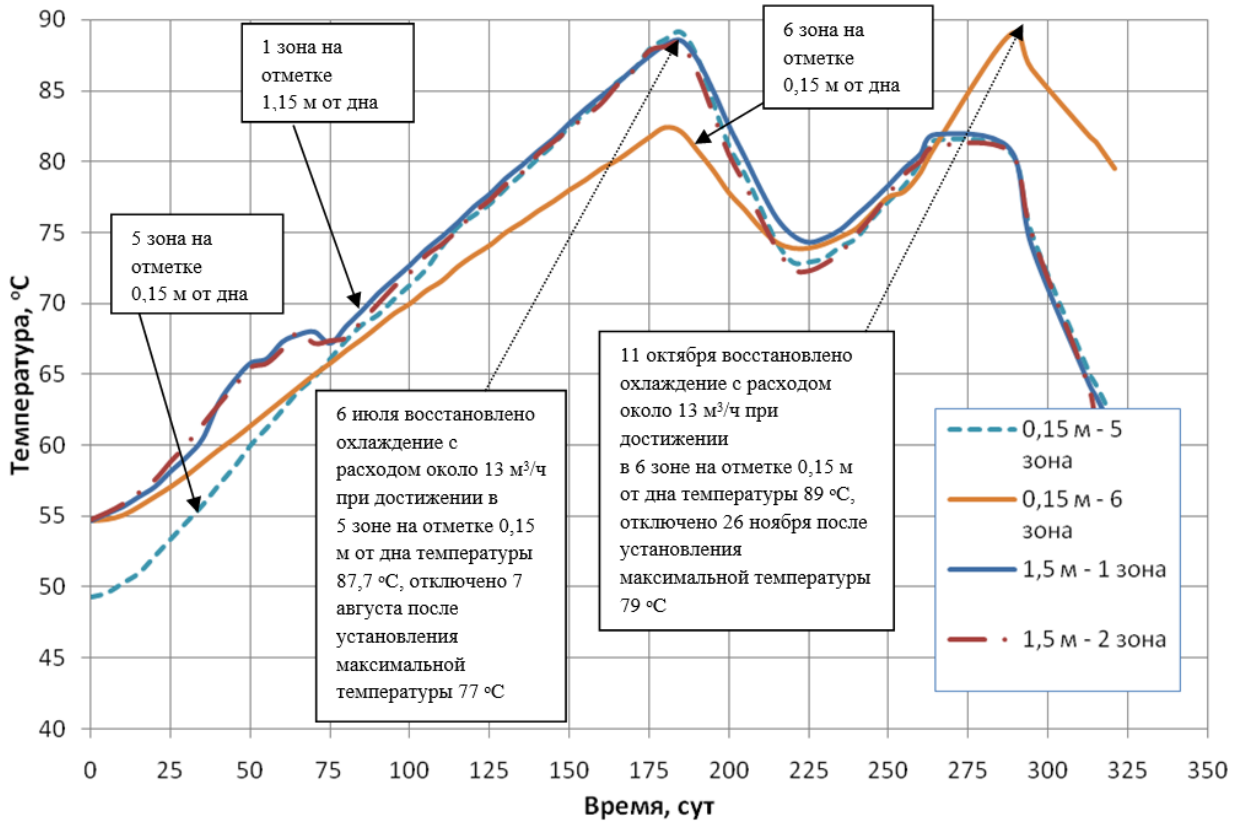


Рисунок 4. График зависимости изменения температур осадков в самых горячих зонах в емкости № 10 от времени в течение эксперимента

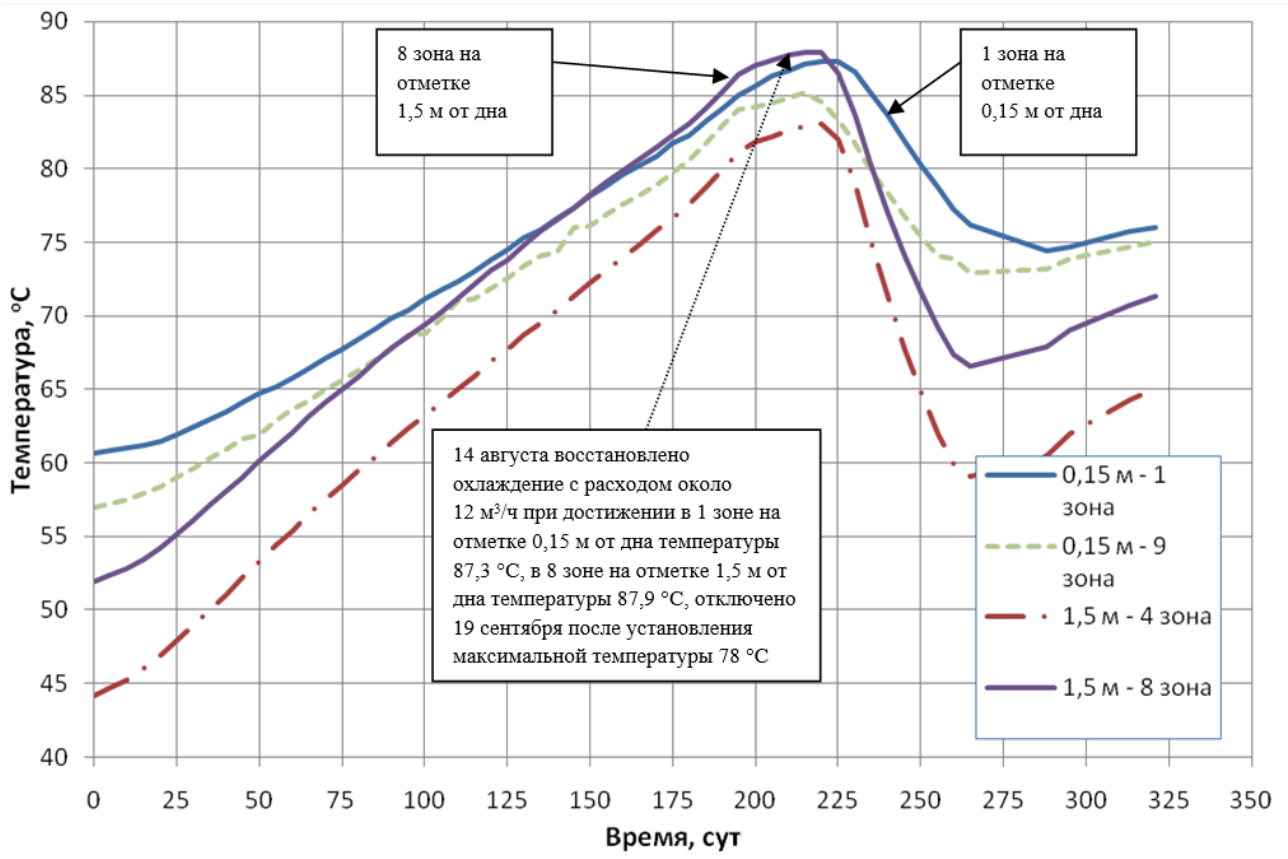


Рисунок 5. График зависимости изменения температур осадков в самых горячих зонах в емкости № 11 от времени в течение эксперимента

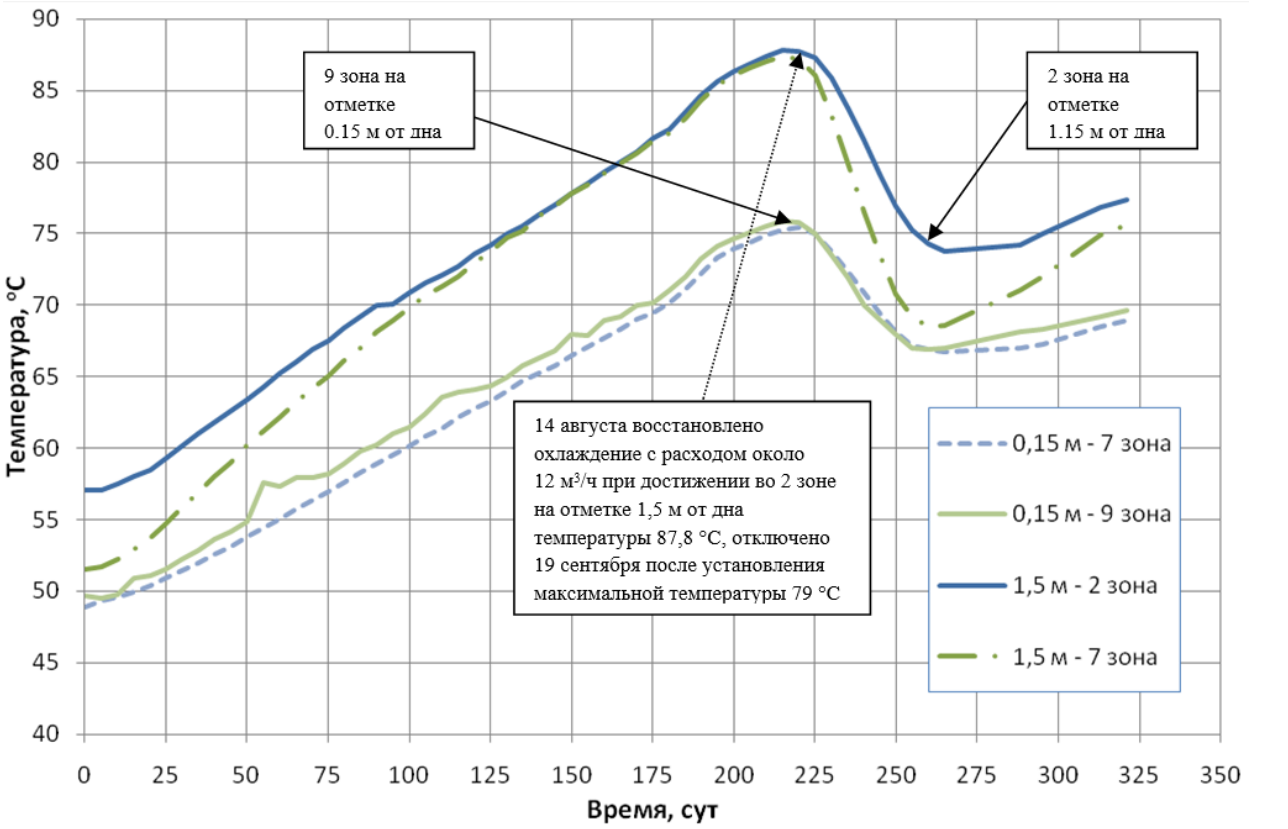


Рисунок 6. График зависимости изменения температур осадков в самых горячих зонах в емкости № 12 от времени в течение эксперимента

Как следует из рис. 3–6, постепенный выход на стационарное состояние аналитически полученной температурной кривой при приближении к 95 °С наблюдается только для емкости № 9. На остальных рассматриваемых емкостях после снятия охлаждения осадки могли бы разогреваться дальше и превысить разрешенную максимальную температуру 95 °С.

Для оценки безопасности процесса необходимо проанализировать инерционность системы при возобновлении охлаждения. Рассмотрим, как изменялась температура на каждой емкости в самой горячей зоне при включении охлаждения. На рис. 7 представлена диаграмма изменения температуры в самых горячих зонах емкостей-хранилищ № 9–12 в течение 14 суток после включения охлаждения.

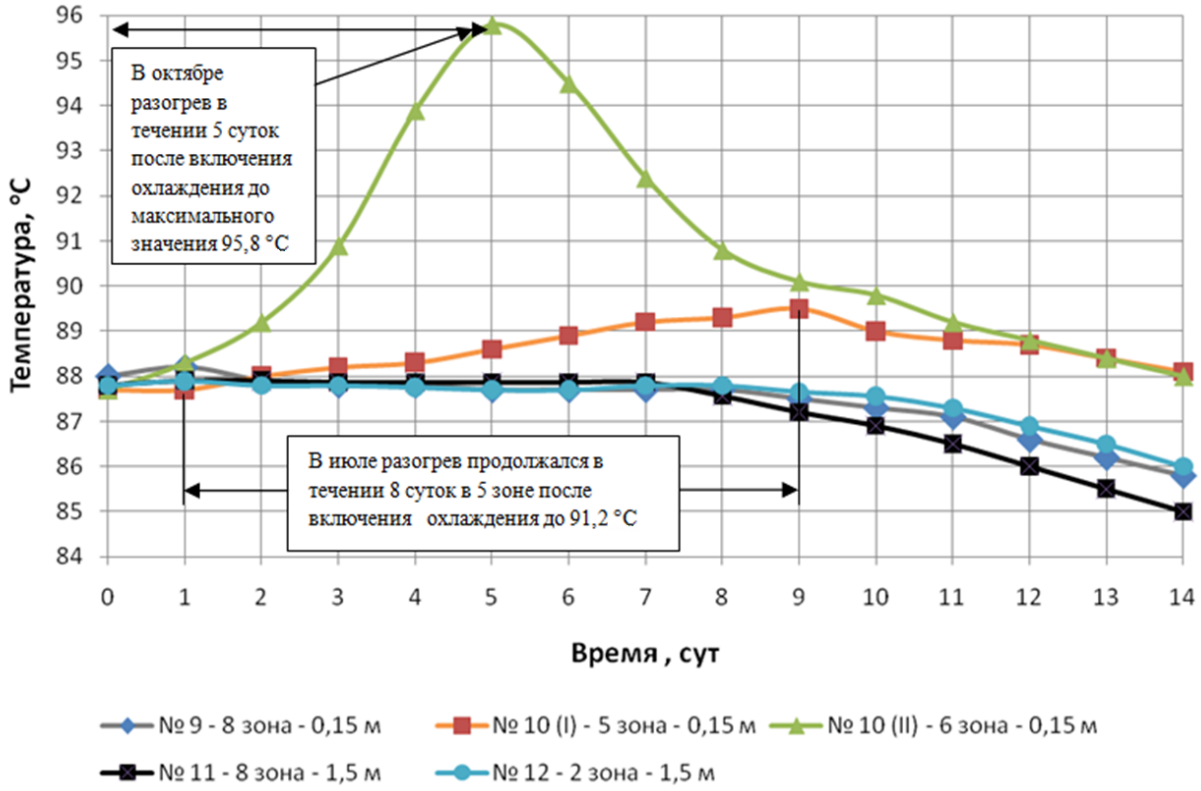


Рисунок 7. Диаграмма изменения температуры в самых горячих зонах емкостей-хранилищ № 9–12 в течение 14 суток после включения охлаждения

Как следует из рис. 7, на емкостях № 9, 11, 12 наблюдался стационарный температурный период в течение приблизительно 8 суток, что указывает на инерционность системы. Впоследствии наблюдалось устойчивое снижение температуры приблизительно на 0,3 / 0,5 / 0,4 °С/сут соответственно. На емкости № 10, наоборот, наблюдалось повышение температуры в первые несколько суток после включения охлаждения. Это было отмечено как в июльском, так и в октябрьском включениях системы охлаждения. В первом случае (июль) разогрев в 5-й зоне продолжался в течение 8 суток, после включения охлаждения до 91,2 °С. На 9-е сутки началось устойчивое падение температуры со средней скоростью 0,3 °С/сут. Во втором случае (октябрь) разогрев продолжался в течение 4 суток после включения охлаждения до максимального значения 95,8 °С. Затем отмечена устойчивая тенденция к снижению температуры.

Необходимо обратить внимание на существование температурных скачков в емкости № 10 после включения охлаждения. Повышение температуры осадка

после включения охлаждения в течение нескольких суток предположительно объясняется влиянием разогрева соседних емкостей (№ 9 и № 11) на режим теплосъема, а также физико-химическими свойствами осадка.

Следующим пунктом работы после включения охлаждения в емкостях-хранилищах стали замеры толщины плотного осадка грузиком (40 г). Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Изменение высоты осадка в емкостях-хранилищах № 9–12 за 2012 г.

Емкость-хранилище, №	Начальный уровень осадка, мм (2010 г.)	Измерение уровня осадка после включения охлаждения		Изменение высоты осадка за рассматриваемый период, мм
		Дата измерения высоты плотного осадка	Высота плотного осадка, мм	
9	3 140	06.11.2012	2 960	180
10	3 180	25.10.2012	2 920	260
11	3 200	14.08.2012	2 810	390
12	2 970	14.08.2012	2 840	130

В соответствии с данными табл. 1 периодическое отключение системы охлаждения в емкостях-хранилищах № 9–12 позволило снизить высоту плотного осадка во всех емкостях на 180, 260, 390 и 130 мм соответственно. В соответствии данными табл. 2 на протяжении нескольких лет высота осадка в емкостях № 9 и 12 оставалась стабильной, а в емкостях № 10 и 11 – снижалась [3].

Таблица 2. Измерение высоты осадка в емкостях-хранилищах № 9–12 с 2010 по 2020 г.

Емкость-хранилище, №	Высота осадка, м		
	2010 г.	2014 г.	2020 г.
9	3,14	2,96	2,90
10	3,18	2,92	2,00
11	3,20	2,81	2,20
12	2,97	2,84	2,90

В соответствии с имеющимися данными наблюдения на протяжении 2021 года температуры осадка в емкостях № 9 (≤ 64,5 ºС), № 11 (≤ 76,6 ºС), № 12 (≤ 63,0 ºС) оставались в регламентных пределах при отключенной системе охлаждения. В емкости № 10 в августе была достигнута температура 83,5 °С, после чего было временно включено охлаждение [3].

4. Заключение

Из анализа проведенной работы по временному отключению систем охлаждения в емкостях-хранилищах № 9–12 и состояния емкостей-хранилищ следует, что по сравнению с 2011 г. растворение осадков прошло в большей степени за счет их разогрева. Данные 2020 г. показали, что высота осадков остается стабильной либо уменьшается.

Однако необходимо обратить внимание на существование температурных скачков в емкости № 10 после включения охлаждения и ограничить температуру разогрева осадков для емкостей-хранилищ с учетом инерционности разогрева

достижением температуры – 85 °С. Увеличение донных температур до данного значения не ухудшает условий взрывопожаробезопасности.

В то же время следует отметить, что дальнейшее проведение процесса выщелачивания путем введения дополнительных объемов щелочи в емкости-хранилища крайне нежелательно и может рассматриваться только в крайних случаях. Объясняется это увеличением солесодержания отходов в результате данной процедуры, что в дальнейшем при извлечении отходов из емкостей-хранилищ повлечет пропорциональное увеличение длительности их переработки (при равной производительности установок), количества отвержденных компаундов 1–3 классов (согласно классификации [4]), а соответственно, и отчислений Национальному оператору по обращению с РАО.

5. Список литературы

1. Подходы к переработке высокоактивных пульп, накопленных на ФГУП "ПО "Маяк" / М. В. Логунов, В. И. Карпов, Н. Е. Дружинина, И. Г. Тананаев // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 1(61). С. 15-28.
2. Логунов, М. В. Стабилизация теплофизического состояния и обследование некоторых ёмкостей-хранилищ высокоактивных пульп на ФГУП "ПО "Маяк" / М. В. Логунов, В. И. Карпов, И. Г. Тананаев // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 4(64). С. 18-27.
3. Основные подходы, опыт и проблемы переработки накопленных в емкостях жидких радиоактивных отходов сложного химического состава / П. В. Козлов, М. Б. Ремизов, Р. А. Макаровский [и др.] // Радиоактивные отходы. 2018. № 4(5). С. 55-66.
4. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 года № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов».

Сведения об авторах:

Старовойтов Николай Петрович, Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк», г. Озёрск, Россия, начальник группы взрывопожаробезопасности ЦЗЛ, starov-nik@yandex.ru, старший преподаватель ОТИ НИЯУ МИФИ.

Козлов Павел Васильевич, Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк», г. Озёрск, Россия, кандидат технических наук, начальник исследовательской лаборатории ЦЗЛ по обращению и кондиционированию радиоактивных отходов, доцент ОТИ НИЯУ МИФИ.

RESULTS OF EXPERIMENTAL OPERATIONS ON TEMPORARY DISCONNECTING THE COOLING SYSTEM IN RADIOACTIVE SUSPENSION STORAGE CONTAINERS

N. P. Starovoitov, V. A. Kazakov, R. E. Abdulvagidov, V. A. Dudkin,
P. V. Kozlov, A. A. Miroshnichenko, S. V. Kustov

Federal State Unitary Enterprise «Production Association «Mayak»

Ozersk, Russia

In 2012, experimental operations were carried out to temporarily disable the cooling system at four refrigerated storage tanks for radioactive suspensions in order to bring them into a more stable and safe state. This paper shows that turning off the cooling of the tanks, which leads to an increase in the temperature of sediments, makes it possible to increase the rate of release (dissolution) of metal compounds and their radionuclides from the sediment and redistribution throughout the volume (pulping). As a consequence of these actions - a decrease in the height of the sediment to stable values. For storage tanks No. 9 and No. 12, the draft height was 2.9 m. For storage tanks No. 10 and No. 11 it was 2.0 m and 2.2 m, respectively. The dissolution of sediments took place to a greater extent due to their heating. The 2020 data showed that the height of precipitation remains stable or decreases. However, in order to assess safety, it is necessary to take into account the inertia of the system when cooling is resumed. Based on the work carried out, it was concluded that the storage tanks for radioactive suspensions are in an explosion- and fire-proof state. At the same time, it should be noted that further carrying out the leaching process by introducing additional volumes of alkali into storage tanks is highly undesirable and can only be considered in extreme cases.

Key words: radioactive materials, storage, suspension, sediment, cooling, heating

References

1. Logunov M.V., Karpov V.I., Druzhinina N.E. Approaches to high-level sludge reprocessing accumulated at Mayak PA. Voprosy radiacionnoj bezopasnosti. 2011. № 1. P. 15-28. (In Russian).
1. Logunov M.V., Karpov V.I. Stabilization of thermophysical state and inspection of several storage tanks for high-level pulps at FSUE Mayak PA. Voprosy radiacionnoj bezopasnosti. 2011. № 4. P. 18-27. (In Russian).
2. Kozlov P.V., Remizov M.B., Makarovskij R.A. et al. Basic approaches, experience and problems related to reprocessing of liquid radioactive waste of complex chemical composition accumulated in storage tanks. Radioaktivnye othody. 2018. № 4(5). P. 55-66. (In Russian).
3. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 19 oktyabrya 2012 goda № 1069 «O kriteriyah otneseniya tverdyh, zhidkih i gazoobraznyh othodov k radioaktivnym othodam, kriteriyah otneseniya radioaktivnyh othodov k osobym radioaktivnym othodam i k udalyaemym radioaktivnym othodam i kriteriyah klassifikacii udalyaemyh radioaktivnyh othodov». (In Russian).

УДК 622.349.5(470)

ЗАЩИЩЕННОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ГЛУБИННОГО ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ ОТРАБОТКЕ УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДОБРОВОЛЬНОГО СЕРНОКИСЛОТНЫМ СКВАЖИННЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ (КУРГАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

И. Н. Солодов

Акционерное общество «Атомредметзолото», г. Москва, Россия

Приведены доказательства геофильтрационной и геохимической природной защищенности подземных вод от глубинного (550–600 м) источника загрязнения, формирующегося в процессе отработки рудных залежей гидрогенного уранового месторождения Добровольного сернокислотным скважинным подземным выщелачиванием. Также описаны способы защиты подземных вод применением надежной конструкции технологических скважин.

Ключевые слова: урановое месторождение, геоэкология, защитные геофильтрационные свойства, защитные геохимические свойства, техногенная защищенность, скважинное подземное выщелачивание, уранодобывающее предприятие.

1. Введение

АО «Далур» ведет освоение идентичных по геологическому строению и гидрогеологическим условиям гидрогенных месторождений урана: Далматовское (Далматовский р-он), Хохловское (Шумихинский р-он) и Добровольное (Звериноголовский р-он) в Курганской области (рис.1) [1]. Месторождение Далматовское находится на завершающей стадии отработки скважинным подземным выщелачиванием (СПВ). Хохловское месторождение отрабатывается СПВ на активной стадии процесса. На месторождении Добровольном в 2020 г. завершены геологоразведочные работы по переводу ресурсов и запасов в промышленные категории С1 и С2. Выполняются работы по обустройству полигона СПВ для опытно-промышленных геотехнологических испытаний и строительству локальной установки переработки продуктивных растворов.

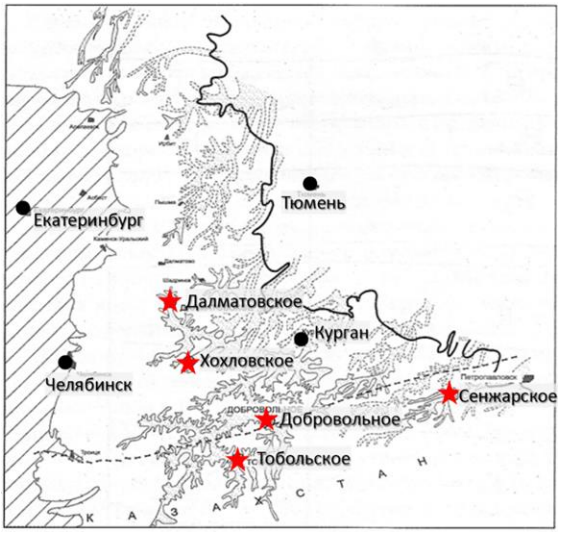


Рисунок 1. Гидрогенные месторождения урана палеодолинного типа в Зауральском ураново-рудном районе [2]

Освоение месторождения Добровольного СПВ вызвало пристальный интерес населения Звериноголовского района Курганской области. Появилось множество антинаучных версий масштабного загрязнения водоносных горизонтов, смежных с рудоносным водоносным горизонтом, вплоть до загрязнения подземных вод в подрусловых отложениях реки Тобол. В связи с этим доказательство экологической безопасности отработки этого месторождения методом СПВ – весьма актуальная проблема.

Защищенность подземных вод обеспечивается двумя группами факторов – природными и техногенными [2]. Среди природных факторов главными являются геофильтрационные (интенсивность водообмена в эксплуатируемом водоносном горизонте, водоупорность пород, отделяющих этот горизонт от смежных с ним в разрезе водоносных горизонтов) и геохимические (нейтрализационная, восстановительная и сорбционная емкости пород, естественная подземная микрофлора) защитные свойства геологической среды. К техногенным факторам относится надежность конструкции технологических скважин и наземной трубопроводной системы, обеспечивающая сохранение основной радиоактивности в недрах и исключающая утечки технологических растворов в недрах и на поверхности земли. Ниже приводятся количественные оценки перечисленных факторов.

Геоэкологические исследования на урановых месторождениях Зауральского рудного района проводятся на всех стадиях освоения: в период геологоразведочных работ, во время отработки и завершения эксплуатации месторождений урана методом СПВ. Их цель – обосновать экологическую безопасность и предотвратить опасные экологические последствия при применении данной технологии отработки месторождений. В этих работах в разное время принимали участие специалисты ИГЕМ РАН, ВСЕГИНГЕО, ВИМС и ФГБУ «Гидроспецгеология».

Обоснованию защищенности геологической среды от подземного источника загрязнения, формирующегося в ходе извлечения урана из руд на месте залегания в рудоносном водоносном горизонте, посвящена данная статья.

2. Урановое месторождение Добровольное – локальная геоэкологическая система

Высказывание в прессе типа: «Добыча урана спровоцирует гибель Тобольского артезианского бассейна» не соответствует 50-летнему опыту промышленного применения СПВ для добычи урана из руд гидрогенных месторождений в Украине, Узбекистане, Казахстане, России, США и Австралии [3–6].

Площадь месторождения Добровольного 32,1 км^2 (рис.2), расположенного в южной части Тобольского артезианского бассейна (370 тыс. км^2), занимает от его территории всего лишь $8{,}7\cdot10^{-5}$ часть. Многолетними наблюдениями в скважинах экологического мониторинга и применения метода бурения контрольных скважин с керном в процессе отработки урановых рудных залежей сернокислотным СПВ в Узбекистане и Казахстане [3, 7, 8], а также при отработке месторождений Далматовского [9] и Хохловского [10] доказано, что в процессе добычи урана растекание технологических растворов за контуры эксплуатируемых залежей не превышает 150 м. Растекание растворов в основном обусловлено нарушением баланса закачиваемых-откачиваемых растворов. Его трудно выявить редкой сетью наблюдательных скважин [11]. Поэтому на помощь экологам приходит компьютерное геоэкологическое моделирование [12, 13], с помощью которого

надежно выявляются и устраняются утечки растворов за контуры балансовых руд урановых залежей.

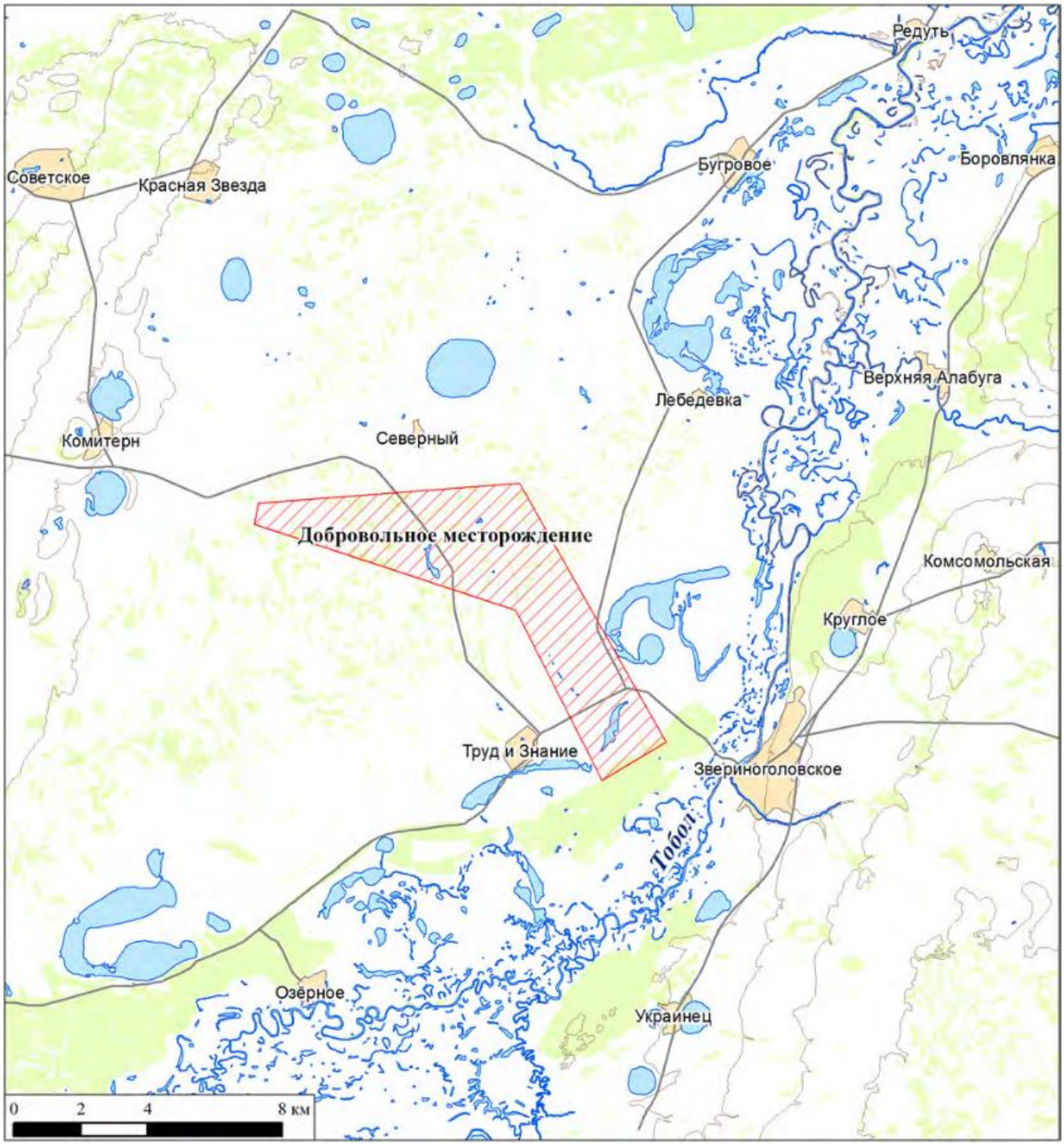


Рисунок 2. Обзорная карта расположения месторождения Добровольного на юго-западе Курганской области

3. Защитные геофильтрационные свойства геологической среды

В гидрогеологическом разрезе месторождения снизу вверх залегают шесть водоносных горизонтов (рис.3) [9, 14]: палеозойский в трещиноватых породах скального основания, рудоносный средневерхнеюрский, мысовский, камышловский, серовский и олигоцен-четвертичный.

Геофильтрационная защищенность от локального техногенного источника загрязнения по латерали эксплуатируемого средневерхнеюрского водоносного горизонта зависит от интенсивности водообмена, а защищенность четырех вышезалегающих водоносных горизонтов – от надежности разделяющих их водоупорных толщ, которая оценивается коэффициентом перетока подземных вод через водоупор (отношение коэффициента фильтрации водоупора к его мощности).

По интенсивности водообмена, которая оценена по величине уклона пьезометрической поверхности подземных вод, в рассматриваемой водонапорной системе выделены зоны: активного (0,0n; серовский и олигоцен-четвертичный горизонты), замедленного (0,00n; камышловский и мысовский горизонты) и весьма замедленного (0,000n; палеозойский и средневерхнеюрский горизонты) водообмена (табл. 1). По аналогии с месторождением Далматовским [9] действительная скорость фильтрации подземных вод в естественных условиях составляет первые сантиметры в год и не способствует миграции техногенных загрязнителей от локального источника загрязнения на значительное расстояние. При продолжительности отработки месторождения (25 лет) смещение техногенных сернокислых растворов естественным потоком подземных вод во время эксплуатации месторождения не превысит нескольких метров. После завершения процесса СПВ линза остаточных сернокислых растворов (будет обсуждено далее) подвергается автоочистке под действием защитных геохимических свойств, которая длится до 80 лет. И даже в этом случае перемещение этой линзы произойдет не более чем на десятки метров. Ни о каком масштабном загрязнении эксплуатируемого водоносного горизонта не может быть и речи.

Все водоносные горизонты изолированы водоупорными толщами (рис.3), основные характеристики которых приведены в табл. 1. Оценка коэффициента перетока, изменяющегося от 10^{-3} до 10^{-7} сут$^{-1}$, выполнена исходя из их фациально-литологических особенностей, а для водоупора перекрывающего рудоносный горизонт дополнительно рассчитана с использованием результатов опытно-фильтрационных работ [14].

О надежности изолирующих свойств водоупорных толщ также свидетельствует четко выраженная вертикальная гидрогеохимическая зональность (табл. 2), которая проявляется в возрастании с глубиной минерализации подземных вод от 1,1 г/л в олигоцен-четвертичном водоносном горизонте до 12,9 г/л в рудоносном средневерхнеюрском горизонте; в смене в этом направлении окислительной обстановки (Eh +150 мВ) – восстановительной (Eh -240 мВ); в изменении химического состава от гидрокарбонатно-кальциевого до хлоридно-натриевого.

Наличие вертикальной гидрогеохимической зональности доказывает отсутствие перетоков подземных вод через водоупорные толщи. Весьма замедленный водообмен в рудоносном средневерхнеюрском водоносном горизонте подтверждает присутствие слаборазбавленных древних морских вод хлоридно-натриевого состава [15].

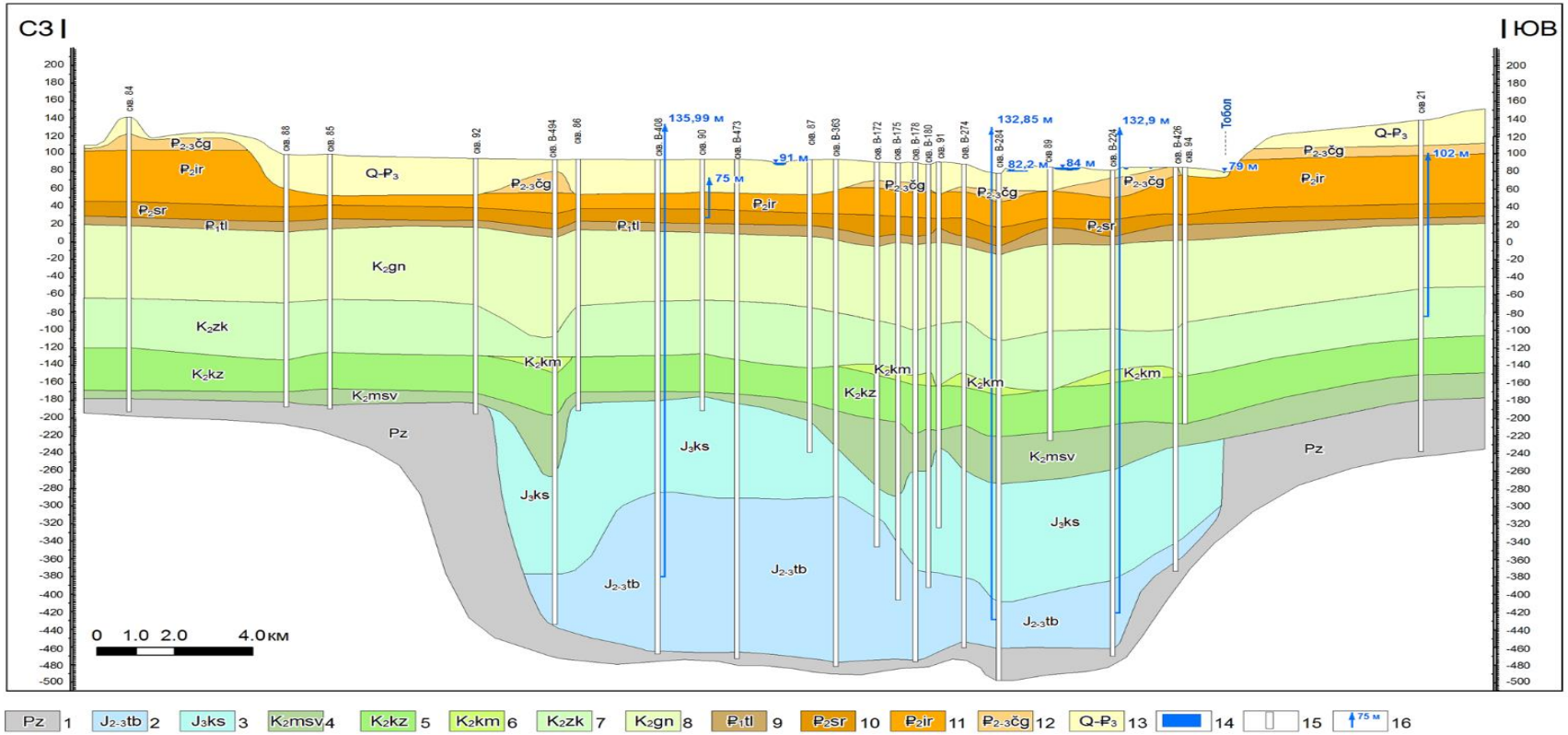


Рисунок 3. Геолого-гидрогеологический разрез через месторождение Добровольное [14]:

1 – палеозойский водоносный комплекс в трещиноватых известняках, песчаниках и гранитоидах, сверху перекрытых водоупорной тощей глинистой коры выветривани; 2 – ураноносный средневерхнеюрский водоносный горизонт (таборинская свита) - пески, гравийники, песчаники и глины с прослоями лигнита; 3 – водоупорная толща (коскольская свита) – глины и алевриты; 4 – мысовский водоносный горизонт (одноименная свита) – пески с прослоями песчаников и гравийно-песчаных отложений; 5 – водоупорная толща (кузнецовская свита) – глины; 6 и 7 – камышовский водоносный горизонт (камышловская и зайковская свиты) – трещиноватые песчаники, опоковидные глины, опоки; 8 – водоупорная толща (ганькинская свита) – мергели, мергелистые и известковистые глины, песчаники; 9 – водоупорная толща (талицкая свита) – глины с примесью гальки и гравия; 10 – серовский водоносный горизонт (одноименная свита) – трещиноватые опоки и песчаники с прослоями глин и алевролитов; 11 – водоупорная толща (ирбитская свита) – диатомиты и трепела с гнёздами алеврита и песка; 12 – водоупорная толща (чеганская свита) – глины; 13 – олигоцен-четвертичный водоносный комплекс - пески, галечники, суглинки, глины; 14 – водоемы и водотоки; 15 – гидрогеологические скважины; 16 – уровень подземных вод (абсолютная отметка, м)

Таблица 1. Геофильтрационные свойства и параметры водоносных горизонтов и водоупорных толщ в районе месторождения Добровольного

Водообмен	**Геологический индекс**	**Водоносный горизонт**		**Коэффициент фильтрации м/сут**	**Водоупорная толща**		**Коэффициент перетока, 1/сут**	**Литологический состав толщи**	**Мощность, м**
Активный	Q	Аллювиальный четвертичный	6	0,1-20,0				Пески, галечники, суглинки, глины	5-50
	N_2-Q	Озёрно-аллювиальный плиоцен-четвертичный		0,01-1				Пески, глины, опоки, мергели	2-10
	P_3tgr	Олигоценовый		0,01-5				Пески, глины, реже алевролиты и галечники	2-20
	P_{2-3}čg				Чеганская свита	V	10^{-5}–10^{-7}	Глины листовато-слоистые	10-25
	P_2ir				Ирбитская свита		10^{-3}–10^{-6}	Глины, опоковидные диатомиты	15-25
Активный	P_2sr	Серовский	5	0,1-5				Опоки, реже песчаники	15-25
	P_2tl				Талицкая свита	IV		Глины запесоченные	3-10
	K_2gn				Ганькинская свита			Мергели	40-60
Замедленный	K_2zk-km	Зайковский и Камышовский	4	0,2-0,7				Песчаники, реже пески, опоки	10-50
	K_2kz				Кузнецовская свита	III	10^{-5}–10^{-7}	Глины	15-50
Замедленный	K_2msv	Мысовский	3	0,5-10				Пески, гравелиты	15-60
	J_3ks				Коскольская свита	II	10^{-5}–10^{-7}	Глины, алевриты, прослои песков	30-100
Весьма замедленный (застойный)	**J_{2-3}tb**	**Средне-верхнеюрский (рудоносный)**	**2**	**3,6-5,7**				**Песок, песчаники, галечники, прослои глин и алевролитов**	**30-100**
	Pz	Глинистая кора выветривания скального основания			Глинистая кора выветривания скального основания	I	10^{-3}–10^{-5}	Глины, алевриты	50
Весьма замедленный (застойный)	Pz	Палеозойский	1	0,3-1,8				Трещиноватые известняки, песчаники, туфопесчаники, гранитоиды	Вскрытая можность 50-100

Таблица 2. Химический состав речных и подземных вод в районе месторождения Добровольное

Гидрогеологический этаж и интенсивность водообмена		Речные и подземные воды. Водоносные горизонты		Химический состав	Cl^-, г/л	pH
Верхний	Зона активного водообмена	р. Тобол		$0{,}18\frac{HCO_3 70\ Cl\ 19\ SO_4 11}{Ca\ 65\ Mg\ 23\ Na\ 12}$	0,017	
		Олигоцен-четвертичный водоносный горизонт		$1{,}1\frac{Cl\ 57\ HCO_3 36\ SO_4 7}{Mg\ 57\ Ca\ 32\ Na\ 11}$	0,35	7,2
		Палеоцен-эоценовый водоносный горизонт		$1{,}5\frac{Cl\ 64\ SO_4 26\ HCO_3 10}{Na\ 56\ Mg\ 26\ Ca\ 18}$	0,54	7
Нижний	Зона замедленного водообмена	Верхнемеловой водоносный комплекс	Водоносный горизонт зайковской и камышовской свит	$7{,}5\frac{Cl\ 85\ SO_4 11\ HCO_3 4}{Na\ 60\ Mg\ 22\ Ca\ 18}$	3,5	7,5
			Мысовский водоносный горизонт			
	Зона весьма замедленного водообмена	Средне-верхнеюрский комплекс	Средне-верхнеюрский водоносный горизонт	$12{,}9\frac{Cl\ 95\ SO_4 4\ HCO_3 1}{Na\ 85\ Ca\ 8\ Mg\ 7}$	7,4	7,5
		Палеозойский водоносный комплекс		$8{,}9\frac{Cl\ 89\ SO_4 9\ HCO_3 2}{Na\ 68\ Mg\ 19\ Ca\ 9}$	4,8	7,5

4. Защитные геохимические свойства геологической среды

Руды месторождения по содержанию урана – бедные – 0,0n % и, соответственно, слаборадиоактивные – 2–5 Бк/г. Подземные воды рудоносного средневерхнеюрского водоносного горизонта непригодны для питьевого, хозяйственного и технического водоснабжения из-за высокой минерализации и не используются для этих целей на всей территории Курганской области. Из 18 естественных радиоактивных изотопов, образующихся при распаде урана, наиболее опасными являются ^{210}Pb, ^{210}Po, ^{226}Ra, ^{227}Ac, ^{230}Th и ^{232}Th, поэтому даже пресные подземные воды в районе урановых рудных залежей непригодны для водопользования.

При использовании разбавленных растворов серной кислоты (5–25 г/л) при СПВ ее расход на растворение урана незначительный – доли процента, тогда как основная его доля приходится на вмещающие уран терригенные отложения (преимущественно пески). В результате из пород извлекается значительная масса петрогенных элементов, из которых выше ПДК питьевых вод в убывающем порядке по содержанию присутствуют: Al, Fe, Mg, Ca, Na, U, Si, Zn, P, K, Mn, Ti, Sr, Ce, Y, La, V, Li, Cr, Ni, Th, Be, Pb, Sn, Sb, Cd, Zr. Также в составе остаточных сернокислых растворов присутствуют в концентрациях выше ПДК техногенные компоненты – SO_4, NO_3 и NH_4.

Линзы остаточных сернокислых сульфатных железо-алюмо-магниевых растворов с большим количеством потенциальных загрязнителей, остающиеся после прекращения СПВ, по площади незначительно превышают размеры отработанных урановых залежей.

Однако их химический состав не остается неизменным на протяжении длительного времени. Происходит их автоочистка как внутри линз, так и при их смещении естественным потоком в область неизмененных техногенезом терригенных отложений под действием защитных геохимических свойств геологической среды. Эти

свойства включают наличие биоактивной естественной подземной микрофлоры, нейтрализационную, восстановительную и сорбционную емкости горных пород.

Многолетними натурными гидрогеохимическими наблюдениями после отработки СПВ рудных залежей месторождений: Далматовское [9], Южный и Северный Букинай [3], Бешкак [7], Канжуган [7] и Ирколь [8] установлено, что под действием нейтрализационной емкости алюмосиликатных и карбонатных минералов происходит нейтрализация серной кислоты от pH 1,5 до pH 6–7 и осаждение сульфата в составе гипса, барита, ярозита и алунита, а также при нейтрализации переходят в твердую фазу элементы гидролизаты – Al, Fe(III), Ti, Zn, Cr, Th, Be, Sn, Cd, Zr. Магний и фосфор осаждаются в составе ньюбериита и вивианита. При смещении линзы естественным потоком подземных вод в область техногенно неизмененных песчаных отложений, помимо формирования нейтрализационного геохимического барьера, формируется восстановительный геохимический барьер, в области которого происходит восстановительное осаждение F(II), Cu, Zn, Ga, As, Se, Cd, Sn, Sb, Te, Hg, Pb и Bi.

В автоочистке остаточных сернокислых растворов существенную роль играет естественная подземная микрофлора – денитрифицирующие и сульфатредуцирующие бактерии. Их высокая биохимическая активность в рудоносном средневерхнеюрском водоносном горизонте доказана микробиологическими исследованиями керна разведочных и контрольных скважин на Далматовском [9] и Хохловском [10] месторождениях. Есть все основания полагать, что они столь же активны на месторождении Добровольном. Денитрифицирующие бактерии полностью перерабатывают техногенный нитрат в газообразный азот, а сульфатредуцирующие превращают сульфат в сероводород, который связывается с Fe (II), Cu, Zn, Cd, Sn, Hg, Pb и осаждается в виде сульфидов.

5. Техногенная защищенность геологической среды

Еще один фактор, который исключает загрязнение технологических скважин и наземного оборудования радиоактивным ^{226}Ra, – сохранение основной радиоактивности на месте залегания выщелоченных урановых руд. Радий с сульфатом серной кислоты образует труднорастворимое соединение. Его сульфаты в виде собственных минералов не обнаружены, т. к. по массе его в подземных водах и в растворах выщелачивания крайне мало – до $40{,}4 \cdot 10^{-11}$ г/л [3]. Но он постоянно фиксируется в составе радиогипса и радиобарита.

Доказательством того, что основная радиоактивность при СПВ сохраняется в недрах, является сравнение прямого определения остаточного содержания урана в рудах методом каротажа нейтронов мгновенного деления (КНД) и рассчитанной фиктивной концентрации урана через коэффициент радиоактивного равновесия между ураном и радием (Крр=1) традиционным методом гамма-каротажа (ГК) (рис. 4) [16]. В выщелоченных рудах в результате выноса урана и сохранения радия на месте залегания равновесие смещается в сторону Ra, и Крр может достигать 190 отн. ед. [16], что приводит к получению фиктивных содержаний урана в рудах при оценке по ГК. Гамма-аномалия по интенсивности не меняется до и после выщелачивания урана.

Защищенность подземных вод от глубинного источника загрязнения также зависит от надежной конструкции технологических закачных и откачных скважин. До недавнего времени в качестве материала обсадных труб в этих скважинах применялся полиэтилен низкого давления (ПНД). У этих труб масса недостатков: отсутствие адгезии с цементом, используемым для заколонной гидроизоляции скважин, отсутствие адгезии с клеями различных марок для обеспечения гидроизоляции резьбовых соединений, большой коэффициент линейного расширения, короткий срок старения и потеря прочности полиэтилена через 7 лет,

плотность ниже плотности воды. В связи с этим для сооружения гидрогеологических и технологических скважин выбрана надежная конструкция и новый материал обсадных труб – непластифицированный поливинилхлорид [17, 18]. Этот материал лишен недостатков, присущих ПНД.

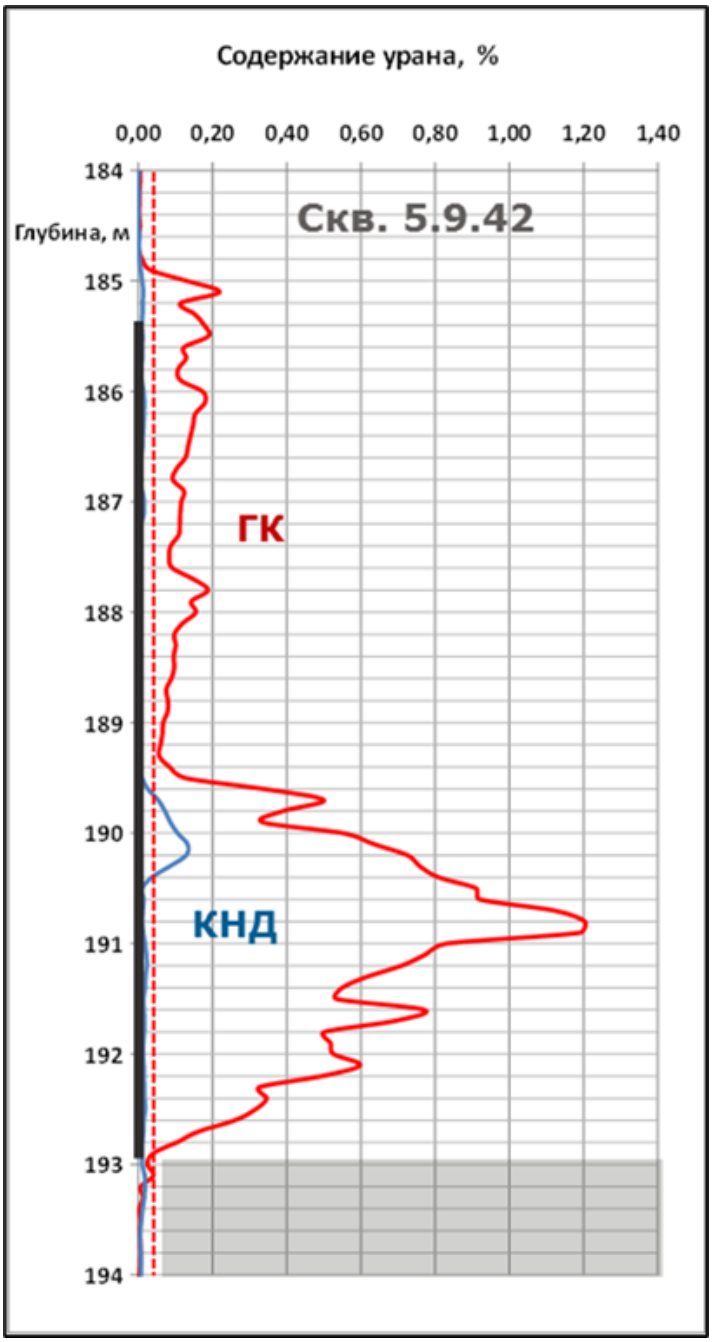


Рисунок 4. Сопоставление фактического содержания урана в рудах, определенного методом КНД, с фиктивным содержанием по ГК. Пунктиром показана граница балансовых урановых руд = 0,01 %

Техническое состояние технологических скважин регулярно проверяется скважинными геофизическими методами: расходометрией, токовым и индукционным каротажами.

6. Заключение

В заключение сформулируем основные принципы обращения с остаточными сернокислыми растворами СПВ и защищенности подземных вод:

1. Линзы остаточных сернокислых растворов, повторяющие контуры рудных залежей, относятся к маломасштабным (локальным) геоэкологическим системам.
2. Природные подземные воды на урановых гидрогенных месторождениях изначально загрязнены продуктами радиоактивного распада (^{210}Po, ^{210}Pb, ^{226}Ra, ^{227}Ac, ^{230}Th, ^{232}Th) и стабильными элементами – спутниками урана (сероводород, селен, мышьяк, молибден, ванадий, бром, фтор, железо, марганец и хром) и поэтому непригодны для питьевого, хозяйственного и технического водоснабжения.
3. СПВ очищает недра от радиоактивности, так как удаляется длительно существующий источник радиоактивности – уран с периодом полураспада 4,6 млрд лет.
4. Низкая скорость движения подземных вод в рудоносном средневерхнеюрском водоносном горизонте не способствует масштабному загрязнению подземных вод (геофильтрационная защищенность).
5. Наличие верхнего водоупора с весьма низким коэффициентом перетока 10^{-5}–10^{-7} сут$^{-1}$ препятствует перетеканию техногенных вод в вышележащие водоносные горизонты (геофильтрационная защищенность).
6. При СПВ в водоносные горизонты искусственно вносятся сульфат, нитрат и аммоний, все остальные компоненты являются петрогенными, извлеченными из горных пород, которые при автоочистке обратно возвращаются в горные породы.
7. Автоочистка линз остаточных растворов начинается с момента прекращения СПВ и протекает внутри линз и при их смещении естественным потоком подземных вод в область неизмененных осадочных пород.
8. Миграции загрязнителей в составе остаточных растворов препятствует комплексный сорбционно-восстановительно-нейтрализационный геохимический барьер.
9. Глубина, масштабы и продолжительность автоочистки растворов оцениваются методом экологического мониторинга подземных вод в наблюдательных скважинах.
10. Очитка остаточных растворов от искусственных и петрогенных техногенных веществ на поверхности методами химических технологий приведет к масштабному загрязнению дневной поверхности.

7. Список литературы

1. Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К. и др. Уран российских недр. – М.: ВИМС. 2010. – 850 с.
2. Солодов И.Н. Геоэкология СПВ урана: природные и техногенные факторы экологической безопасности // Научно–практическая конференция «Решение экологических и технологических проблем горных производств на территории России, ближнего и дальнего зарубежья». – М.: ВНИПИПТ. 21–22 марта 2019. С. 41–51.
3. Подземное выщелачивание полиэлементных руд / Под ред. Н.П.Лаверова. – М.: Изд–во Академии горных наук. 1998. – 446 с.
4. Pool T.C., Beneš V., Jones B.L. et al. In Situ Leach Uranium Mining: An Overview of Operations // IAEA Nuclear Energy Series. No. NF–T–1.4, Vienna, 2016 – 76 p.
5. Seredkin M., Solodov I. In–Situ Recovery (ISR) Symposium // 23rd Annual Conference Proceedings. Perth, Australia, ALTA – 2018. P. 5 – 12.
6. Hiam–Galves D., Gerber E., Pekrul J. et al. In–Situ Recovery (ISR) – The Permitting Challenge // 25rd Online Conference. Environmental. Perth, Australia, ALTA – 2020. P. 64 – 73.
7. Солодов И.Н., Величкин В.И., Рубцов М.Г. и др. Гидрогеохимический каротаж: теория и практика // М.: Едиториал УРСС, 2005. – 320 с.
8. Язиков В.Г., Забазнов В.Л. Вопросы геоэкологии при подземном скважинном выщелачивании урана // Горный информационно–аналитический бюллетень (научно–технический журнал). Москва. 2003. 237 с.
9. Солодов И.Н., Марков С.Н., Попонина Г.Ю. и др. Геоэкологический паспорт уранового месторождения Далматовское // Отчет НИОКР, с. Уксянкое Курганской обл., фонды АО «Далур». 1993. 106 с.
10. Величкин В.И., Солодов И.Н., Дойникова О.А. и др. Изучение геохимических и минералогических особенностей урановых руд месторождения Хохловское // Материалы по геологии месторождений урана. М.: ВИМС. Информационный сборник КНТС. 2009. Вып. 154. С. 69 – 93.
11. Caruso D., Vepsalainen M., McGregor K. et al. Trials at Depth with Vesitm – A New Ground Water Monitoring Technology for ISR Operations // 25rd Online Conference. Environmental. Perth, Australia, ALTA – 2020. P. 88 – 99.
12. Носков М.Д., Бабкин А.С., Кеслер А.Г. и др. Экологический мониторинг и прогнозирование состояния недр при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания // Сборник трудов VII Международной научно–практической конференции «Актуальные проблемы урановой промышленности»» / Алматы. 2014. С. 355 – 361.
13. Noskov M., Solodov I., Kesler A., Terovskaya T. et al. Groundwater Contamination and Self–Purification at Uranium Pro–duction by the In Situ Leaching Process // International Symp. on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM–2018) // Vienna Austria. 25–29 June 2018. P. 307 – 310.
14. Глинский М.Л., Глаголев А.В. Геоэкологические исследования на Добровольном месторождении // Отчет НИР по договору № 099/3523–Д. Этап 3. 2018. – 83 с.
15. Ковальчук А.И. Особенности структурной гидрогеологии Тобольского артезианского бассейна // В кн.: "Химический состав и ресурсы подземных вод Предуралья и Зауралья". Изд–во АН СССР. Уральский научный центр. 1986. С. 79 – 88.
16. Миносьянц А.Р., Солодов И.Н., Гурулев Е.А. Применение каротажа мгновенных нейтронов на разных стадиях освоения урановых месторождений методом СПВ // Разведка и охрана недр. 2019. №7. С. 22 – 30.

17. Арсентьев Ю.А., Назаров А.П., Забайкин Ю.В. и др. О расчете эксплуатационных колонн из полимерных материалов для условий многолетнемерзлых пород // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: российский и зарубежный опыт. Научное обозрение. Вып. №21 – М.: ООО ИПЦ «Маска», 2019. С. 27 – 31.
18. Иванов А.Г., Солодов И.Н. О выборе материала обсадных труб для оборудования эксплуатационных скважин подземного выщелачивания // Горный журнал. 2018. №8. С. 81 – 85.

Сведения об авторе:

Солодов Игорь Николаевич, АО «Атомредметзолото», доктор геолого-минералогических наук, директор программ инновационного и технологического развития, 109004, г. Москва, Б. Дровяной пер., д. 22, sin1950@gmail.com

PROTECTION OF GROUNDWATER FROM A DEEP SOURCE OF POLLUTION DURING THE DEVELOPMENT OF A URANIUM DEPOSIT DOBROVOLNY BY SULFURIC ACID IN-SITU LEACHING (KURGAN REGION)

I. N. Solodov

ARMZ Uranium Holding Co

Evidence is provided for the geofiltration and geochemical natural protection of groundwater from a deep (550–600 m) source of pollution, which is formed in the process of mining ore deposits of the hydrogenous uranium deposit Dobrovolny by sulfuric acid in-situ leaching. Methods for protecting groundwater using a reliable design of technological wells are also described.

Key words: uranium deposit, geoecology, protective geofiltration properties, protective geochemical properties, technological protection, in-situ leaching, uranium mining enterprise.

References

1. Mashkovtsev G.A., Konstantinov A.K., Miguta A.K. et al. Uran rossiyskih nedr. – M.: VIMS. 2010. 850 p. (In Russian).
2. Solodov I.N. Geoekologiya SPV urana: prirodnye i tehnogennye factory ekologicheskoy bezopasnosti. Nauchno–prakticheskaya konferentsiya “Reshenie ekologicheskih problem gornyh proizvodstv na territorii Rossii, blizhnego i dalnego zarubezhia”. – M.: VNIPIPT. March 21–22, 2019. P. 41–51. (In Russian).
3. Podzemnoye vyschelachivaniye polielementnyh rud. Pod red. N.P.Laverov – M.: Izd–vo Akademii gornyh nauk. 1998. 446 p. (In Russian).
4. Pool T.C., Beneš V., Jones B.L. et al. In Situ Leach Uranium Mining: An Overview of Operations. IAEA Nuclear Energy Series. No. NF–T–1.4, Vienna, 2016 – 76 p.

5. Seredkin M., Solodov I. In–Situ Recovery (ISR) Symposium. 23rd Annual Conference Proceedings. Perth, Australia, ALTA – 2018. 5 –12 p.
6. Hiam–Galves D., Gerber E., Pekrul J. et al. In–Situ Recovery (ISR) – The Permitting Challenge. 25rd Online Conference. Environmental. Perth, Australia, ALTA – 2020. P. 64 – 73.
7. Solodov I.N., Velichkin V.I., Rubtsov M.G. i dr. Gidrogeokhimicheskiy karotazh: teoriya i praktika. M.: Yeditorial URSS, 2005. 320 p. (In Russian).
8. Yazikov V.G., Zabaznov V.L. Voprosy geoekologii pri podzemnom skvazhinnom vyshchelachivanii urana. Gornyy informatsionno–analiticheskiy byulleten' (nauchno–tekhnicheskiy zhurnal). Moskva. 2003. 237 p. (In Russian).
9. Solodov I.N., Markov S.N., Poponina G.YU. i dr. Geoekologicheskiy pasport uranovogo mestorozhdeniya Dalmatovskoye. Otchet NIOKR, s. Uksyankoye Kurganskoy obl., fondy AO «Dalur». 1993. 106 p. (In Russian).
10. Velichkin V.I., Solodov I.N., Doynikova O.A. i dr. Izucheniye geokhimicheskikh i mineralogicheskikh osobennostey uranovykh rud mestorozhdeniya Khokhlovskoye. Materialy po geologii mestorozhdeniy urana. M.: VIMS. Informatsionnyy sbornik KNTS. 2009. Vyp. 154. P. 69 – 93. (In Russian).
11. Caruso D., Vepsalainen M., McGregor K. et al. Trials at Depth with Vesitm – A New Ground Water Monitoring Technology for ISR Operations. 25rd Online Conference. Environmental. Perth, Australia. ALTA. 2020. P. 88 – 99.
12. Noskov M.D., Babkin A.S., Kesler A.G. i dr. Ekologicheskiy monitoring i prognozirovaniye sostoyaniya nedr pri dobyche urana metodom skvazhinnogo podzemnogo vyshchelachivaniya. Sbornik trudov VII Mezhdunarodnoy nauchno–prakticheskoy konferentsii «Aktual'nyye problemy uranovoy promyshlennosti». Almaty. 2014. P. 355 – 361. (In Russian).
13. Noskov M., Solodov I., Kesler A., Terovskaya T. et al. Groundwater Contamination and Self–Purification at Uranium Pro–duction by the In Situ Leaching Process. International Symp. on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM–2018). Vienna Austria. 25–29 June 2018. P. 307 – 310.
14. Glinskiy M.L., Glagolev A.V. Geoekologicheskiye issledovaniya na Dobrovol'nom mestorozhdenii. Otchet NIR po dogovoru № 099/3523–D. Etap 3. 2018. 83 p. (In Russian).
15. Koval'chuk A.I. Osobennosti strukturnoy gidrogeologii Tobol'skogo artezianskogo basseyna. V kn.: "Khimicheskiy sostav i resursy podzemnykh vod Predural'ya i Zaural'ya". Izd–vo AN SSSR. Ural'skiy nauchnyy tsentr. 1986. P. 79 – 88. (In Russian).
16. Minos'yants A.R., Solodov I.N., Gurulev Ye.A. Primeneniye karotazha mgnovennykh neytronov na raznykh stadiyakh osvoyeniya uranovykh mestorozhdeniy metodom SPV. Razvedka i okhrana nedr. 2019. №7. P. 22 – 30. (In Russian).
17. Arsent'yev YU.A., Nazarov A.P., Zabaykin YU.V. i dr. O raschete ekspluatatsionnykh kolonn iz polimernykh materialov dlya usloviy mnogoletnemerzlykh porod. Aktual'nyye problemy i perspektivy razvitiya ekonomiki: rossiyskiy i zarubezhnyy opyt. Nauchnoye obozreniye. Vyp. №21 – M.: OOO IPTS «Maska», 2019. P. 27 – 31. (In Russian).
18. Ivanov A.G., Solodov I.N. O vybore materiala obsadnykh trub dlya oborudovaniya ekspluatatsionnykh skvazhin podzemnogo vyshchelachivaniya. Gornyy zhurnal. 2018. №8. P. 81 – 85. (In Russian).

УДК 574.3:577.34:623.772:581.19:581.543

ВРЕМЕННÁЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РЕАКЦИЙ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ХРОНИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ: ВОЗМОЖНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ АДАПТАЦИИ К АБИОТИЧЕСКОМУ СТРЕССУ

Е. В. Антонова, Н. С. Шималина, В. Н. Позолотина

Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Проанализированы современные данные об изменяющихся во времени отдаленных последствиях действия ионизирующей радиации у растений. Оценка радиобиологических эффектов основана на анализе данных о мощности поглощенной дозы и концепции референтных видов (Публикация 108 МКРЗ). Выделены основные направления, необходимые для разработки методологии наблюдений за состоянием популяций во времени: 1) оценка трансгенерационных эффектов у растений из зон радиоактивного загрязнения после снятия стресса; 2) изучение многолетней динамики качества семенного потомства для оценки взаимодействия факторов радиационной и нерадиационной природы; 3) сравнение сезонных (внутригодовых) ритмов физиологического и биохимического статуса семенного потомства, сформировавшегося в зоне загрязнения и за ее пределами. Анализ данных позволяет установить некоторые закономерности формирования адаптивных реакций растений во времени при сочетанном воздействии факторов разной природы, что необходимо для усовершенствования принципов экологического нормирования, разрабатываемых в области радиационной безопасности.

Ключевые слова: растения, окислительный стресс, метеоусловия, трансгенерационные эффекты, биохимический статус, многолетние и сезонные ритмы.

1. Введение

Глобальное загрязнение биосферы искусственными радионуклидами произошло в XX в. в результате испытаний ядерного оружия и развития ядерных технологий. Начальные этапы создания предприятий ядерно-топливного цикла и развитие атомной отрасли на территории СССР характеризовались рядом аварий и инцидентов, которые привели к обширному загрязнению долгоживущими радионуклидами природных экосистем [1]. Одной из первых в истории атомной отрасли СССР была авария на ПО «Маяк» в 1957 г., в результате которой сформировался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС) [2–4]. Авария на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) в 1986 г. привела к самому масштабному радиоактивному загрязнению Северного полушария [5–7]. Авария на АЭС Фукусима-1 (ФАЭС) в 2011 г. стала причиной загрязнения, в основном экосистем Японии и акватории Тихого океана [8].

В зонах радиационных аварий и инцидентов популяции растений в течение многих поколений существуют в условиях хронического облучения, поэтому такие территории служат уникальными полигонами для изучения отдаленных биологических эффектов и адаптивных ответов, позволяющих растениям стабильно существовать в условиях загрязнения [5, 9]. Для оценки хронического действия ионизирующего излучения на наземные экосистемы Международная комиссия по радиологической защите определила несколько референтных групп растений. Эталоном древесных растений выбрана сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), а

травянистых видов – дикорастущие злаки, похожие на ячмень (*Hordeum vulgare* L.) [10]. На современном этапе развития радиобиологии очевидно, что для выявления более широкого спектра возможных адаптивных реакций растений на хроническое облучение важно расширять список исследованных видов [4].

В природных популяциях, испытывающих техногенный стресс, комплекс абиотических и биотических факторов может оказывать модифицирующее влияние на проявление биологических эффектов, индуцированных техногенным воздействием [11–13]. К таким модификаторам можно отнести погодные условия, влияние которых особенно актуально оценивать в условиях изменения климата. Кроме того, хроническое воздействие малых доз радиации может вызывать специфические эффекты, которые проявляются не только у облученных организмов, но и их потомков [14–16].

Цель настоящей работы – обобщение литературных данных по многолетним наблюдениям и экспериментальным оценкам отдаленных последствий действия радиации на растения и их сообщества. Анализ состояния природных сообществ в зонах радиоактивного загрязнения позволяет прогнозировать судьбу популяций во времени и пространстве.

2. Материалы и методы

Проведен анализ 130 публикаций, доступных в открытой печати. Статья построена по типу описательного обзора и не содержит элементы мета-анализа.

3. Результаты

На современном этапе развития радиационной биологии особое внимание уделяется изучению влияния малых доз радиации на растения, поскольку в зонах загрязнения спустя десятилетия после аварий дозы формируются в основном за счет радионуклидов с периодом полураспада около 30 лет [12, 17, 18]. В настоящее время проводятся исследования, в которых рассматриваются разные аспекты влияния хронического облучения на растения в зонах радиоактивного загрязнения, сформировавшихся в результате крупнейших аварий на предприятиях атомной промышленности: ЧАЭС [19–23], ФАЭС [24–29], ПО «Маяк». На территории ВУРСа продолжается наиболее длительное изучение биологических эффектов в популяциях растений [4, 11, 30–35].

3.1 Трансгенерационные эффекты

Трансгенерационные эффекты, или ответные реакции, проявляющиеся в ряде поколений у потомков, которые не испытывали стресс, но произошли от родителей после воздействия на них тех или иных абиотических факторов (облучение, тяжелые металлы, наночастицы, осмотический и солевой стресс, недостаточность микроэлементов, низкие или высокие температуры и т. д.), были исследованы у разных групп живых организмов: бактерий [36], растений [16, 37–47], нематод [48, 49], насекомых [50–52], ракообразных [53], рыб [54], млекопитающих [55, 56] и человека [57].

Одной из форм адаптивной трансгенерационной пластичности является материнский эффект. Он возникает, когда фенотип матери или среда, в которой она находится, влияют на фенотип ее потомства сверх прямого влияния передаваемых генов (наследственная компонента) [58, 59]. Формирование этого эффекта в первую очередь связано с тем, что зигота развивается на материнском растении и яйцеклетки уже содержат некоторый запас питательных веществ и специфичных метаболитов (активных форм кислорода, играющих сигнальную роль, фитогормонов, микроРНК и

др.), способствующих устойчивости потомства [58]. Другим вариантом трансгенерационных изменений является отпечаток стресса или стрессовый импринтинг (*stress imprint*) [14], описывающий феномен устойчивого изменения метаболизма под воздействием различных факторов, который проявляется у растения в дальнейшем ходе его жизненного цикла, а также у его потомков.

Помимо наследственной компоненты, закрепившейся в популяции вследствие отбора, трансгенерационные эффекты имеют и ненаследственную (эпигенетическую) составляющую [15, 60–62], поскольку выявлена их существенная роль в процессе адаптации организмов к стрессовым воздействиям, в т. ч. к повышенному радиационному фону [63]. К эпигенетическим механизмам трансгенерационных эффектов относится метилирование ДНК, модификации гистонов, РНК-опосредованные модификации (например, некодирующие РНК) и т. д. [64]. Повышение уровня полногеномного метилирования в результате радиационного воздействия (13,23 сЗв/ч) было выявлено у F_7 сои, культивируемой в зоне ЧАЭС [20], а также у произрастающих там же резушки *Arabidopsis thaliana* [65] и сосны *Pinus sylvestris* [66, 67]. В подобных случаях гиперметилирование можно рассматривать как реакцию на стресс и общий защитный механизм растений, который предотвращает геномные перестройки [65].

3.2 Антиоксидантный статус растений

Ионизирующее облучение приводит к усилению образования активных форм кислорода (АФК), что способствует формированию окислительного стресса у живых организмов. Поэтому особую роль в устойчивости растений к радиационному воздействию играет эффективность работы системы антиоксидантной защиты [68–75]. В качестве маркеров окислительного стресса используется содержание реактивных продуктов тиобарбитуровой кислоты, основным из которых является малоновый диальдегид (MDA), образующийся как вторичный продукт перекисного окисления липидов [76]. Повышение содержания MDA в тканях растений было показано в лабораторных экспериментах при хроническом облучении (гамма-облучение в дозе 50 Гр в течение 2–4 недель) пшеницы *Triticum aestivum* L. [77] и после острого облучения семян маша *Vigna mungo* L. в дозе 1200 Гр [78]. Повышение содержания MDA было отмечено в хвое *P. sylvestris* при мощности поглощенной дозы 66,6 мГр/год [74], пастушьей сумки (1,5 мкГр/ч), клевера *Trifolium repens* (5–5,5 мкГр/ч) и одуванчика *Taraxacum officinale* (8 мкГр/ч) [79], длительное время произрастающих в зоне влияния аварии на ЧАЭС. Однако в некоторых исследованиях в условиях хронического облучения не было обнаружено различий между импактными и фоновыми выборками по содержанию MDA, например, у резушки *A. thaliana* в лабораторном эксперименте (81–2336 мкГр/ч) [80], у ольховника *Duschekia fruticosa*, произрастающего на отвалах урановой руды (мощность экспозиционной дозы 150 мкГр/ч) [81] и водосбора *Aquilegia vulgaris* (мощность поглощенной дозы 8–12,5 мкГр/ч) [79]. Эти различия могут быть связаны с активацией системы антиоксидантной защиты (АОС).

Усиление работы АОС в условиях облучения выражается в повышении активности некоторых ферментов, в первую очередь супероксиддисмутазы (SOD), пероксидазы (POD) и каталазы (CAT) [75]. Так, у ковыля *Stipa capillata*, произрастающего на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП), при мощности дозы 5,4–25 мкГр/ч увеличение активности SOD, POD и CAT было ассоциировано с повышением радиорезистентности к острому облучению [69]. У *A. thaliana*, произрастающей в зоне отчуждения ЧАЭС, в побегах увеличивалась активность гваякол-POD; активность CAT и аскорбат-POD значительно снижалась с увеличением мощности дозы от 0,48 до 6,8 мкГр/ч [73]. У следующего поколения, выращенного в лабораторных условиях после снятия окислительного стресса, не

было выявлено различий с контролем по активности антиоксидантных ферментов [82]. У *P. sylvestris* из зоны ЧАЭС и фоновых территорий различия в активности SOD и CAT отсутствовали, в то время как активность POD снижалась с увеличением дозовой нагрузки (33,1–38,6 мГр/год) [74]. В то же время в зоне ВУРСа у подорожника *Plantago major* (19,1–157,1 мкГр/ч) наблюдался прооксидантный сдвиг – повышение активности SOD и CAT по сравнению с фоновыми растениями [34]. Было также показано, что в популяциях *P. sylvestris* из зоны ЧАЭС частота мутаций в локусах, кодирующих ферменты антиоксидантной системы, значимо превышает контрольный уровень и возрастает вместе с дозой, поглощенной генеративными органами растений (33,1–38,6 мГр/год) [83]. Однако у *A. thaliana*, облучаемой в лабораторном эксперименте (81–2336 мкГр/ч), изменений в активности ферментов АОС не наблюдалось [80].

В поддержании гомеостаза участвуют и другие компоненты АОС, в т. ч. низкомолекулярные антиоксиданты (НМАО) [74, 84]. Так, у дескурайнии *Descurainia sophia* и клоповника *Lepidium apetalum* наблюдалась положительная зависимость между выживаемостью проростков и содержанием НМАО [85], а у костреца *Bromus inermis* – отрицательная [86]. При этом содержание НМАО в проростках *B. inermis* из хронически облучаемых выборок было выше, чем из фоновых [86]. Однако у *P. sylvestris* из зоны ЧАЭС роста концентрации НМАО от увеличения дозы облучения не наблюдалось [74]. Таким образом, интенсивность окислительного стресса и модуляция работы АОС определяется не только интенсивностью радиационной нагрузки, но и особенностями каждого вида.

3.3 Межгодовая изменчивость качества семенного потомства растений

К настоящему времени накоплен колоссальный полевой и экспериментальный материал по оценке действия ионизирующей радиации на биоту [9, 12, 17, 75, 87–89]. Однако, несмотря на это, проблема далека от завершения. Это связано с тем, что в ходе исследований выявляются новые факторы, способные модифицировать радиобиологические эффекты. В природных экосистемах воздействие техногенного загрязнения на популяции растений сопряжено с влиянием всей совокупности биотических и абиотических факторов, при этом могут наблюдаться синергические, антагонистические и аддитивные эффекты [11, 17, 90, 91]. Так, краткосрочные, выполняемые в течение 1–2 лет исследования не могут выявить роль погодных условий при проявлении радиобиологических эффектов. Кроме того, эффекты, которые были выявлены в отдельные годы, требуют подтверждения или опровержения в дальнейших исследованиях.

В зоне влияния ЧАЭС было показано, что организмы в их естественной среде обитания были более чувствительны к радиации, чем в условиях контролируемых экспериментов [92]. Подобные противоречия часто объясняются способностью погодных условий (температура, осадки и их соотношение) оказывать модифицирующее действие на радиобиологические эффекты [11, 12, 31]. При этом фоновые и импактные популяции растений, как было показано на примере пустырника *Leonurus quinquelobatus* из зоны ВУРСа, могут демонстрировать разные физиологические отклики при действии одного и того же климатического фактора [31]. Так, для импактных популяций при дефиците осадков была характерна низкая радиоустойчивость. Эти данные согласуются с исследованиями, проведенными на разных по радиоустойчивости сортах яровой пшеницы: повреждающий эффект радиации усиливался в засушливый период вегетации [93]. Прохладные и избыточно увлажненные условия формирования семян приводили к снижению жизнеспособности семенного потомства пшеницы *T. aestivum*, однако после дополнительного облучения была отмечена стимуляция роста и развития проростков. Кроме того, такие условия индуцировали увеличение доли аномальных проростков

относительно оптимальных погодных условий [94]. Вероятно, в условиях хронического облучения выборки становятся более чувствительными и лабильными к любым изменениям окружающей среды, а в результате взаимодействия техногенного фактора и погодных условий возникают синергические эффекты.

У одуванчика *Taraxacum officinale* из зоны ВУРСа за 14 лет наблюдений отмечен эффект гормезиса в год с наиболее благоприятным температурным режимом и экстремальное снижение качества семян в год с низкими температурами и избыточными осадками, при этом в фоновых популяциях показатели не выходили за рамки обычных межгодовых колебаний, то есть были в пределах нормы реакции [11]. Однако у *B. inermis* из зоны ВУРСа не было выявлено значимого влияния исследованных погодно-климатических факторов на качество семенного потомства, поскольку межгодовая изменчивость показателей жизнеспособности в импактных выборках в два-три раза превышала фоновый уровень [86]. Увеличение диапазона изменчивости разных признаков у растений в условиях действия малых доз радиации является одним из проявлений нестабильности генома, способной порождать разнонаправленные эффекты при взаимодействии облучения с другими экологическими факторами [11]. У сосны *P. sylvestris* из зоны ЧАЭС было показано, что семена характеризуются высокой межгодовой изменчивостью жизнеспособности, которая во многом определяется погодными условиями, при этом значительного эффекта взаимодействия между облучением в малых дозах и погодными условиями не было обнаружено [91].

Многолетние исследования *L. quinquelobatus* из зоны ВУРСа [31] показали значимое влияние погодных условий предыдущего вегетативного сезона на качество семян следующего сезона. Аналогичные данные приводятся и для одуванчика из зоны химического загрязнения: была показана отрицательная связь между осадками сентября – октября прошлого года и числом цветоносов в текущем сезоне [95]. Также отмечена отрицательная связь между фитомассой травянистых растений и осенними осадками для фоновых сообществ и положительная связь – для импактных ценозов [96]. В целом высокие температуры и водный стресс в период созревания увеличивали всхожесть семян *A. thaliana* [97].

Исследования отдаленных последствий хронического облучения на растения в зоне ВУРСа [11, 30, 31, 86, 98, 99] и в зоне ЧАЭС [91, 100, 101] свидетельствуют о том, что погодные факторы играют ключевую роль при формировании качества семенного потомства. В работе [91] показано отсутствие корреляции между уровнем радиационной нагрузки и долей абортивных семян, а также всхожестью семян сосны в зоне ЧАЭС. Однако высокая эффективная температура и низкое количество осадков в мае снижали долю абортивных семян у сосны. Высокие эффективные температуры в августе [91] и осадки в мае [100] приводили к снижению всхожести семян сосны. Противоположные зависимости были получены при исследовании некоторых видов травянистых растений ВУРСа: у *T. officinale*, дремы *Silene latifolia* отмечены положительные зависимости между жизнеспособностью семенного потомства и температурой мая, июня, августа [3, 12]. У звездчатки *Stellaria graminea* отмечены негативные зависимости качества семян от температуры в июне [98]. Полученные данные о влиянии погодных условий на межгодовую динамику качества семенного потомства растений, произрастающих в условиях хронического облучения, указывают на специфику видов. Кроме того, необходимо использовать унифицированный комплекс метеорологических параметров при прогнозировании последствий радиоактивного загрязнения.

3.4 Внутригодовая изменчивость качества семенного потомства растений

Все процессы в живых организмах подчиняются разнообразным ритмам, которые обусловлены внешними и внутренними факторами [102]. К внешним

регулирующим биоритмы факторам растений относят уровень освещенности, длину фотопериода, температуру, наличие патогенов, направление вектора гравитации, геомагнитное поле Земли, которые растения воспринимают с помощью пяти фоторецепторов (фитохромы, криптохромы, фототропины, белки семейства ZEITLUPE и рецептор УФ излучения В-диапазона UVR8) [103].

К эндогенным факторам прорастания семян относят: 1) гормональную регуляцию, сформированную в период эмбриогенеза, в виде повышенных концентраций абсцизовой кислоты (АБК); 2) запас мРНК, который ослабляет действие АБК и усиливает влияние гиббереллинов [104]; 3) участие фитохромов в экспрессии генов, обеспечивающих синтез биологически активных форм гиббереллиновой кислоты [105]; 4) экспрессию гена *DOG1*, задерживающего прорастание семян [106]. Имеются данные об изменении количества антиоксидантов при прорастании [107]. Особый интерес представляет взаимодействие фитохромов с жасмонатами, поскольку эти фоторецепторы регулируют остановку роста растений в ответ на стресс-зависимую активацию жасмонатного сигналинга [103]. Все вышеописанные процессы могут быть модифицированы хроническим облучением в малых дозах.

Внутригодовая (сезонная) динамика разных физиологических признаков, характеризующих семенное потомство, также подвержена ритмическим колебаниям. Так, у *B. inermis* в разные месяцы годового эксперимента варьировала не только выживаемость проростков, их реакция на дополнительное облучение, но и частота проявления морфозов [108]. При этом в выборках из зоны ВУРСа размах изменчивости признаков был выше по сравнению с фоновыми популяциями, что может быть связано с радиационно-индуцированной нестабильностью генома, которая возникает в условиях облучения в малых дозах [109]. В качестве необходимых условий возникновения этого эффекта могут выступать первоначальные повреждения молекул ДНК и усиленная продукция АФК [110].

При изучении дремы *S. latifolia* было показано, что минимальные значения жизнеспособности семенного потомства характерны для выборки с наиболее загрязненного участка. Как и в случае с кострецом *B. inermis*, наибольшая чувствительность к облучению и доля проростков с аномалиями в развитии отмечена в физиологически неблагоприятный осенне-зимний период в выборках из зоны ВУРСа [111]. Аналогичные данные были получены в экспериментах с одуванчиком *T. officinale* [112]. В зоне ЧАЭС было обнаружено сильное негативное влияние повышенной радиации на сроки и скорость прорастания семян дикой моркови *Daucus carota*, а также задержка в развитии растений на более поздних стадиях [19]. Следовательно, хроническое облучение вызывает изменение ритмики процессов у растений.

Изменение амплитуды и периода колебаний разных процессов в условиях облучения, возможно, связано с работой фитохромов [113–119] и регулируемым ими окислительно-восстановительным балансом. Эта гипотеза подтверждается, с одной стороны, положительной связью антиоксидантного статуса проростков *B. inermis* с их скоростью роста и развития, а с другой стороны, отрицательной связью с частотой аномалий в развитии проростков [108]. В ряде работ подобные колебания авторы связывают также с изменением свойств цитоплазмы и проницаемости клеточных мембран, в т. ч. за счет перекисного окисления липидов (ПОЛ) [120–122], и экспрессией генов [123, 124]. Возможно, ПОЛ изменяет и ритм прорастания семян, подвергшихся облучению. В течение года разные фазы процесса (максимальное перекисное окисление или высокая активность антиоксидантных систем) могут приводить к подавлению или стимуляции прорастания. Другим возможным механизмом динамики различных процессов у растений во времени может быть изменение экспрессии генов циркадных часов. Например, в работе [125] было показано, что тритиевая вода изменяет ключевые компоненты ритмических процессов

в организме. Это может быть связано с реакцией на H_2O_2 и АФК, которые также описываются как генный регулятор циркадного ритма.

Важную роль в прорастании семян играет цикличность периода покоя [126] и генотипическая изменчивость [127–129]. Вариабельность биоритмов отражает включение различных путей поддержания гомеостаза, которые с помощью прямых и обратных связей возвращают измененный облучением метаболизм к норме. Поскольку процессы разворачиваются во времени и обладают инерцией, они могут приводить как к гиперкомпенсации с фиксацией эффектов радиостимуляции, так и к недостаточной компенсации [130]. Затем процессы повторяются вновь с затухающей амплитудой.

4. Заключение

Международным радиобиологическим сообществом рассматриваются разные аспекты влияния хронического облучения на растения в зонах радиоактивного загрязнения, сформировавшихся в результате крупных аварий (Кыштымская, Чернобыльская, Фукусимская) и на различных испытательных полигонах. Исследования, с одной стороны, направлены на мониторинг состояния организмов и их сообществ в условиях хронического облучения и создание научной основы природоохранных мероприятий. С другой стороны, фундаментальная задача таких изысканий связана с раскрытием механизмов, обеспечивающих устойчивое существование живых организмов и их сообществ в условиях изменчивого во времени и пространстве комплекса биотических и абиотических факторов.

Анализ литературы показал, что для оценки адаптивных реакций растений из зон радиоактивного загрязнения возможны несколько перспективных подходов: 1) изучение трансгенерационных эффектов в чреде поколений после снятия техногенного стресса на основании данных по изменчивости показателей жизнеспособности, радиочувствительности, мутабильности, про- и антиоксидантного статуса семенного потомства растений; 2) многолетние мониторинговые исследования изменчивости физиологических параметров у семенного потомства растений с учетом влияния погодных условий; 3) анализ внутригодовых биоритмов качества семян по изменчивости физиологических и биохимических параметров проростков.

Декларированные в данной статье направления получат свое развитие при изучении травянистых видов растений, длительное время произрастающих в зоне ВУРСа и на сопредельных фоновых территориях и обладающих разной радиочувствительностью.

6. Благодарности

Поиск и обновление данных проведено в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН, обобщение и интерпретация полученных результатов – при финансовой поддержке гранта РНФ (№21-74-00038).

7. Список литературы

1. Li C., Alves dos Reis A., Ansari A. et al. Public health response and medical management of internal contamination in past radiological or nuclear incidents: A narrative review // Environment International. 2022. V. 163. 107222.
2. Nikipelov B.V., Romanov G.N., Buldakov L.N. et al. About accident on Southern Urals of 29 September 1957 // Inform. Bull. Interdepartmental. Council for Information and Public Relations in the Atomic Energy. 1990. P. 39–48 (in Russian).

3. Aarkrog A., Dahlgaard H., Nielsen S.P. et al. Radioactive inventories from the Kyshtym and Karachay accidents: Estimates based on soil samples collected in the South Urals (1990-1995) // Sci Tot Environ. 1997. V. 201, № 2. P. 137−154.
4. Pozolotina V.N., Molchanova I.V., Karavaeva E.N. et al. The Current State of Terrestrial Ecosystems at the East Ural Radioactive Trace area: Contamination Levels and Biological Effects Ekaterinburg: Goshchitsky Press, 2008. 204 p. (in Russian).
5. Aleksakhin R.M., Sanzharova N.I., Fesenko S.V. Radioecology and the accident at the Chernobyl nuclear power plant // Atomic Energy. 2006. V. 100, № 4. P. 267−276.
6. Kozubov G.M., Taskaev A.I. Radiobiology and radioecology of wood plants. SPb: Nauka, 1994. 256 p. (in Russian).
7. Alexakhin R., Anspaugh L., Balonov M. et al. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Report of the Chernobyl Forum Expert group «Environment»: IAEA, 2006. 166 p.
8. Zheng J., Tagami K., Watanabe Y. et al. Isotopic evidence of plutonium release into the environment from the Fukushima DNPP accident // Sci Rep. 2012. V. 2. P. 304.
9. Geras'kin S.A. Ecological effects of exposure to enhanced levels of ionizing radiation // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. V. 162–163. P. 347−357.
10. Publication 108: Environmental Protection − the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP, 2008. 251 p.
11. Pozolotina V.N., Antonova E.V. Temporal variability of the quality of Taraxacum officinale seed progeny from the East-Ural Radioactive Trace: is there an interaction between low level radiation and weather conditions? // International Journal of Radiation Biology. 2017. V. 93, № 3. P. 330−339.
12. Mousseau T.A., Møller A.P. Plants in the Light of Ionizing Radiation: What Have We Learned From Chernobyl, Fukushima, and Other «Hot» Places? // Frontiers in Plant Science. 2020. V. 11, № 552.
13. Bradshaw C. Are There Ecosystem-Relevant Endpoints for Measuring Radiation Impacts? // Biomarkers of Radiation in the Environment / Eds Wood M.D., Mothersill C.E., Tsakanova G. et al. Dordrecht: Springer, 2022. P. 223−243.
14. Bruce T.J.A., Matthes M.C., Napier J.A. et al. Stressful «memories» of plants: Evidence and possible mechanisms // Plant Science. 2007. V. 173, № 6. P. 603−608.
15. Boyko A., Kovalchuk I. Genome instability and epigenetic modification − heritable responses to environmental stress? // Current Opinion in Plant Biology. 2011. V. 14, № 3. P. 260−266.
16. Latzel V., Janeček Š., Doležal J. et al. Adaptive transgenerational plasticity in the perennial Plantago lanceolata // Oikos. 2014. V. 123, № 1. P. 41−46.
17. Caplin N., Willey N. Ionizing Radiation, Higher Plants, and Radioprotection: From Acute High Doses to Chronic Low Doses // Frontiers in Plant Science. 2018. V. 9, № 847.
18. Karimullina E.M., Mikhailovskaya L.N., Pozolotina V.N. et al. Radionuclide uptake and dose assessment of 14 herbaceous species from the East-Ural Radioactive Trace area using the ERICA Tool // Environ Sci Pollut Res. 2018. V. 25, № 14. P. 13975–13987.
19. Boratyński Z., Arias J.M., Garcia C. et al. Ionizing radiation from Chernobyl affects development of wild carrot plants // Scientific Reports. 2016. V. 6. 39282.
20. Georgieva M., Rashydov N.M., Hajduch M. DNA damage, repair monitoring and epigenetic DNA methylation changes in seedlings of Chernobyl soybeans // DNA Repair. 2017. V. 50. P. 14–21.
21. Duarte G.T., Volkova P.Y., Geras'kin S.A. The response profile to chronic radiation exposure based on the transcriptome analysis of Scots pine from Chernobyl affected zone // Environmental Pollution. 2019. V. 250. P. 618–626.
22. Geras'kin S., Volkova P., Vasiliyev D. et al. Scots pine as a promising indicator organism for biomonitoring of the polluted environment: A case study on chronically irradiated

populations // Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis. 2019. V. 842, P. 3−13.
23. Geras'kin S.A., Fesenko S.V., Volkova P.Y. et al. What Have We Learned about the Biological Effects of Radiation from the 35 Years of Analysis of the Consequences of the Chernobyl NPP Accident? // Biology Bulletin. 2021. V. 48, № 12. P. 2105−2126.
24. Yoschenko V., Ohkubo T., Kashparov V. Radioactive contaminated forests in Fukushima and Chernobyl // Journal of Forest Research. 2018. V. 23, № 1. P. 3−14.
25. Horemans N., Nauts R., Vives i Batlle J. et al. Genome-wide DNA methylation changes in two Brassicaceae species sampled alongside a radiation gradient in Chernobyl and Fukushima // J Environ Radioact. 2018. V. 192. P. 405−416.
26. Rakwal R., Hayashi G., Shibato J. et al. Progress toward rice seed OMICS in low-level gamma radiation environment in Iitate Village, Fukushima // Journal of Heredity. 2018. V. 109, № 2. P. 206−211.
27. Vasiliev D.V., Geraskin S.A., Yoschenko V.I. et al. Cytogenetic effects in the needles intercalar meristem of Japanese red pine in the remote period after the Fukushima NPP accident // Ecological genetics. 2020. V. 18, № 4. P. 483−492 (in Russian).
28. Bitarishvili S.V., Geras'kin S.A., Yoschenko V.I. et al. Change in the Phytohormonal Status of Japanese Red Pine after the Fukushima Accident // Rus J Ecol. 2021. V. 52, № 2. P. 109−117.
29. Geras'kin S., Yoschenko V., Bitarishvili S. et al. Multifaceted effects of chronic radiation exposure in Japanese red pines from Fukushima prefecture // Science of the Total Environment. 2020. P. 142946.
30. Antonova E.V., Karimullina E.M., Pozolotina V.N. Intraspecific variation in Melandrium album along a radioactive contamination gradient at the Eastern Ural radioactive trace // Rus J Ecol. 2013. V. 44, № 1. P. 18–27.
31. Antonova E.V., Pozolotina V.N. Interannual Quality Variability in Motherwort (Leonurus quinquelobatus) Seed Progeny under Chronic Radiation Exposure // Rus J Ecol. 2020. V. 51, № 5. P. 417–429.
32. Antonova E.V., Shoeva O.Y., Khlestkina E.K. Biochemical and genetic polymorphism of Bromopsis inermis populations under chronic radiation exposure // Planta. 2019. V. 249, № 6. P. 1977–1985.
33. Pozolotina V.N., Lebedev V.A., Antonova E.V. et al. Current State of Tree Stands in the East-Ural Radioactive Trace Area Closest to Kyshtym Accident Epicenter // Rus J Ecol. 2021. V. 52, № 6. P. 578–590.
34. Shimalina N.S., Orekhova N.A., Pozolotina V.N. Features of Prooxidant and Antioxidant Systems of Greater Plantain Plantago major Growing for a Long Time under Conditions of Radioactive Contamination // Russian Journal of Ecology. 2018. V. 49, № 5. P. 375–383.
35. Pozolotina V.N. Remote consequences of radiation effect on the plants. Ekaterinburg: Goshchitsky Press, 2003. 244 p. (in Russian).
36. Lampe N., Marin P., Coulon M. et al. Reducing the ionizing radiation background does not significantly affect the evolution of Escherichia coli populations over 500 generations // Scientific Reports. 2019. V. 9, № 1. P. 14891.
37. Pozolotina V.N. Remote effect of irradiation on a heterogenesis of apomictic plants // Radiats Biol Radioecol. 2003. V. 43, № 4. P. 462−470. (in Russian).
38. Byeon B., Bilichak A., Kovalchuk I. Transgenerational Response to Heat Stress in the Form of Differential Expression of Noncoding RNA Fragments in Brassica rapa Plants // The Plant Genome. 2018. V. 12, № 1. P. 180022.
39. Laanen P., Saenen E., Mysara M. et al. Changes in DNA Methylation in Arabidopsis thaliana Plants Exposed Over Multiple Generations to Gamma Radiation // Frontiers in Plant Science. 2021. V. 12, № 532. 611783.

40. Makarenko E.S., Oudalova A.A. Assessment of morphometric indices in the second generation of Scots pine trees in the Chernobyl exclusion zone // Russian Journal of Genetics: Applied Research. 2017. V. 7, № 2. P. 170−171.
41. Ou X., Zhang Y., Xu C. et al. Transgenerational Inheritance of Modified DNA Methylation Patterns and Enhanced Tolerance Induced by Heavy Metal Stress in Rice (Oryza sativa L.) // PLoS One. 2012. V. 7, № 9. e41143.
42. Pernis M., Skultety L., Shevchenko V. et al. Soybean recovery from stress imposed by multigenerational growth in contaminated Chernobyl environment // Journal of Plant Physiology. 2020. V. 251. P. 153219.
43. Quan J., Münzbergová Z., Latzel V. Time dynamics of stress legacy in clonal transgenerational effects: a case study on Trifolium repens // Authorea Preprints. 2021.
44. Racette K., Rowland D., Tillman B. et al. Transgenerational stress memory in seed and seedling vigor of peanut (Arachis hypogaea L.) varies by genotype // Environmental and Experimental Botany. 2019. V. 162. P. 541−549.
45. Reza Rahavi M., Migicovsky Z., Titov V. et al. Transgenerational Adaptation to Heavy Metal Salts in Arabidopsis // Frontiers in Plant Science. 2011. V. 2, № 91. P. 1−10.
46. Tabassum T., Farooq M., Ahmad R. et al. Seed priming and transgenerational drought memory improves tolerance against salt stress in bread wheat // Plant Physiology and Biochemistry. 2017. V. 118. P. 362−369.
47. Miao S.L., Bazzaz F.A., Primack R.B. Persistence of Maternal Nutrient Effects in Plantago major − the 3rd Generation // Ecology. 1991. V. 72, № 5. P. 1634−1642.
48. Buisset-Goussen A., Goussen B., Della-Vedova C. et al. Effects of chronic gamma irradiation: a multigenerational study using Caenorhabditis elegans // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. V. 137. P. 190−197.
49. Wamucho A., Heffley A., Tsyusko O.V. Epigenetic effects induced by silver nanoparticles in Caenorhabditis elegans after multigenerational exposure // Science of the Total Environment. 2020. V. 725. 138523.
50. Hancock S., Vo N.T.K., Omar-Nazir L. et al. Transgenerational Effects of Historic Radiation Dose in Pale Grass Blue Butterflies Around Fukushima Following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Meltdown Accident // Environmental Research. 2019. V. 168. P. 230−240.
51. Kobiela M.E., Snell-Rood E.C. Nickel Exposure Has Complex Transgenerational Effects in a Butterfly // Integrative and Comparative Biology. 2018. V. 58, № 5. P. 1008−1017.
52. Yushkova E., Bashlykova L. Transgenerational effects in offspring of chronically irradiated populations of Drosophila melanogaster after the Chernobyl accident // Environmental and Molecular Mutagenesis. 2021. V. 62. P. 39–51.
53. Massarin S., Alonzo F., Garcia-Sanchez L. et al. Effects of chronic uranium exposure on life history and physiology of Daphnia magna over three successive generations // Aquatic Toxicology. 2010. V. 99, № 3. P. 309−319.
54. Noëmie G., Béatrice G., Virginie C. et al. Multigenerational exposure to gamma radiation affects offspring differently over generations in zebrafish // Aquatic Toxicology. 2022. V. 244. P. 106101.
55. Ali H.E.A., Barber R.C., Dubrova Y.E. The effects of maternal irradiation during adulthood on mutation induction and transgenerational instability in mice // Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis. 2012. V. 732, № 1−2. P. 21−25.
56. Ryabokon N.I., Goncharova R.I. Transgenerational accumulation of radiation damage in small mammals chronically exposed to Chernobyl fallout // Radiation and Environmental Biophysics. 2006. V. 45, № 3. P. 167−177.
57. Yeager M., Machiela M.J., Kothiyal P. et al. Lack of transgenerational effects of ionizing radiation exposure from the Chernobyl accident // Science. 2021. V. 372, № 6543. P. 725−729.

58. Mousseau T.A., Fox C.W. Maternal Effects As Adaptations. Oxford: Oxford University Press, 1998. 400 p.
59. Galloway L.F. Maternal effects provide phenotypic adaptation to local environmental conditions // New Phytologist. 2005. V. 166, № 1. P. 93–99.
60. Bilichak A., Kovalchuk I. Transgenerational response to stress in plants and its application for breeding // J Exp Bot. 2016. V. 67, № 7. P. 2081−2092.
61. Herman J., Sultan S. Adaptive Transgenerational Plasticity in Plants: Case Studies, Mechanisms, and Implications for Natural Populations // Frontiers in Plant Science. 2011. V. 2. P. 102.
62. Vanyushin B.F., Ashapkin V.V. DNA methylation in higher plants: past, present and future // Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Gene Regulatory Mechanisms. 2011. V. 1809, № 8. P. 360−368.
63. Horemans N., Spurgeon D.J., Lecomte-Pradines C. et al. Current evidence for a role of epigenetic mechanisms in response to ionizing radiation in an ecotoxicological context // Environmental Pollution. 2019. V. 251. P. 469−483.
64. Ho D.H., Burggren W.W. Epigenetics and transgenerational transfer: a physiological perspective // The Journal of experimental biology. 2010. V. 213, № 1. P. 3−16.
65. Kovalchuk I., Abramov V., Pogribny I. et al. Molecular aspects of plant adaptation to life in the Chernobyl zone // Plant Physiology. 2004. V. 135, № 1. P. 357−363.
66. Kovalchuk O., Burke P., Arkhipov A. et al. Genome hypermethylation in Pinus silvestris of Chernobyl − a mechanism for radiation adaptation? // Mutation Research-Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis. 2003. V. 529, № 1−2. P. 13−20.
67. Volkova P.Y., Geras'kin S.A., Horemans N. et al. Chronic radiation exposure as an ecological factor: Hypermethylation and genetic differentiation in irradiated Scots pine populations // Environmental Pollution. 2018. V. 232, № Supplement C. P. 105−112.
68. Pastori G.M., Foyer C.H. Common Components, Networks, and Pathways of Cross-Tolerance to Stress. The Central Role of “Redox” and Abscisic Acid-Mediated Controls // Plant Physiology. 2002. V. 129, № 2. P. 460−468.
69. Zaka R., Vandecasteele C.M., Misset M.T. Effects of low chronic doses of ionizing radiation on antioxidant enzymes and G(6)PDH activities in Stipa capillata (Poaceae) // Journal of Experimental Botany. 2002. V. 53, № 376. P. 1979–1987.
70. Kim J.-H., Baek M.-H., Chung B.Y. et al. Alterations in the photosynthetic pigments and antioxidant machineries of red pepper (Capsicum annuum L.) seedlings from gamma-irradiated seeds // Journal of Plant Biology. 2004. V. 47, № 4. P. 314−321.
71. Abramov V.I., Stepanova A.A., Famelis S.A. Some radiobiological effects in higher plants growing at the territory of the East Ural radioactive trace // Radiats Biol Radioecol. 2010. V. 50, № 3. P. 345–351 (in Russian).
72. van de Walle J., Horemans N., Saenen E. et al. Arabidopsis plants exposed to gamma radiation in two successive generations show a different oxidative stress response // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. V. 165. P. 270−279.
73. Morozova V., Kashparov V., Levchuk S.Y. et al. The functional state of cellular antioxidant defence system of shoots of Arabidopsis thaliana exposed to the chronic ionizing radiation in the Chornobyl exclusion zone // Yaderna Fyizika Ta Energetika. 2016. V. 17, № 3. P. 302−307.
74. Volkova P.Y., Geras’kin S.A., Kazakova E.A. Radiation exposure in the remote period after the Chernobyl accident caused oxidative stress and genetic effects in Scots pine populations // Scientific Reports. 2017. V. 7. P. 43009.
75. Gudkov S.V., Grinberg M.A., Sukhov V. et al. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants // Journal of Environ Radioact. 2019. V. 202. P. 8−24.
76. Baraboy V.A., Orel V.E., Karnaukh I.M. Peroxidation and radiation. Kyiv: Nauk. Dumka, 1991. 256 p. (in Russian).

77. Hong M.J., Kim J.-B., Yoon Y.H. et al. The effects of chronic gamma irradiation on oxidative stress response and the expression of anthocyanin biosynthesis-related genes in wheat (Triticum aestivum) // International Journal of Radiation Biology. 2014. V. 90, № 12. P. 1218−1228.
78. Yasmin K., Arulbalachandran D., Soundarya V. et al. Effects of gamma radiation (γ) on biochemical and antioxidant properties in black gram (Vigna mungo L. Hepper) // International Journal of Radiation Biology. 2019. V. 95, № 8. P. 1135−1143.
79. Volkova P.Y., Duarte G.T., Kazakova E.A. et al. Radiosensitivity of herbaceous plants to chronic radiation exposure: Field study in the Chernobyl exclusion zone // Sci Tot Envir. 2021.10.1016/j.scitotenv.2021.146206. P. 146206.
80. Vandenhove H., Vanhoudt N., Cuypers A. et al. Life-cycle chronic gamma exposure of Arabidopsis thaliana induces growth effects but no discernable effects on oxidative stress pathways // Plant Physiology and Biochemistry. 2010. V. 48, № 9. P. 778−786.
81. Filippov E.V., Zhuravskaya A.N., Prokopiev I.A. et al. Effect of Uranium and Thorium Radionuclides on Biochemical Characteristics of Duschekia fruticosa in «Soil–Plant» System // Radiats Biol Radioecol. 2016. V. 56, № 5. P. 535–541 (in Russian).
82. Morozova V., Kashparova E., Levchuk S. et al. The progeny of Chernobyl Arabidopsis thaliana plants does not exhibit changes in morphometric parameters and cellular antioxidant defence system of shoots // Journal of Environ Radioactivity. 2020. V. 211. P. 106076.
83. Volkova P.Yu., Geraskin S.A. Polymorphism of antioxidant enzymes in chronically irradiated Scots pine populations // Ecological genetics. 2013. V. 11, № 3. P. 48−62 (in Russian).
84. Khramova E.P., Tarasov O.V., Krylova E.I. et al. Features of the accumulation of flavonoids in plants under conditions of radioactive contamination // Issues of radiation safety. 2006. № 4. P. 13−21 (in Russian).
85. Prokop’ev I.A., Zhuravskaya A.N., Filippova G.V. Variability of biochemical parameters and radiation resistance of the seed progeny of Descurainia sophia and Lepidium apetalum under exposure to various factors // Rus J of Ecol. 2011. V. 42, № 4. P. 277–282.
86. Antonova E.V., Pozolotina V.N., Karimullina E.M. Variation in the seed progeny of smooth brome grass, Bromus inermis Leyss., under conditions of chronic irradiation in the zone of the Eastern Ural Radioactive Trace // Rus J Ecol. 2014. V. 45, № 6. P. 508−516.
87. Grodzinsky D.M. Plant radiobiology. Kyiv: Nauk. dumka, 1989. 384 p. (in Russian).
88. Esnault M.A., Legue F., Chenal C. Ionizing radiation: Advances in plant response // Environmental and Experimental Botany. 2010. V. 68, № 3. P. 231–237.
89. Volkova P.Y., Duarte G.T., Soubigou-Taconnat L. et al. Early response of barley embryos to low- and high-dose gamma irradiation of seeds triggers changes in the transcriptional profile and an increase in hydrogen peroxide content in seedlings // Journal of Agronomy and Crop Science. 2020. V. 206, № 2. P. 277−295.
90. Petin V.G., Zhurakovskaya G.P., Komarova L.N. Radiobiological basis is synergetic ralations in biosphere. Moscow: Geos, 2012. 219 c. (in Russian).
91. Geras’kin S., Vasiliyev D., Makarenko E. et al. Influence of long-term chronic exposure and weather conditions on Scots pine populations // Environmental Science and Pollution Research. 2017. V. 24, № 12. P. 11240–11253.
92. Garnier-Laplace J., Geras'kin S., Della-Vedova C. et al. Are radiosensitivity data derived from natural field conditions consistent with data from controlled exposures? A case study of Chernobyl wildlife chronically exposed to low dose rates // J Environ Radioact. 2013. V. 121, № Special Issue. P. 12–21.
93. Ul'yanenko L.N., Kruglov S.V., Filipas A.S. et al. Effect of ionizing radiation and climatic factors on wheat productivity // Agricultural biology. 2001. № 5. P. 69–74 (in Russian).

94. Antonova E.V., Khlestkina E.K. Radiosensitivity and mutability of wheat seed progeny cultivated under adverse environments // Plant Physiology and Biochemistry. 2019. V. 137. P. 162−168.
95. Zhuikova T.V. Response of populations and herbaceous plant communities to chemical polluted area: Ekaterinburg, 2009. 40 p. (in Russian).
96. Zhuikova T.V, Bezel V.S., Bergman I. et al. Dependence of phytomass of herbaceous cenoses on weather factors in anthropogenically impacted areas // Contemporary Problems of Ecology. 2018. V. 11, № 4. P. 428−437.
97. Abo Gamar M.I., Qaderi M.M. Interactive effects of temperature, carbon dioxide and watering regime on seed germinability of two genotypes of Arabidopsis thaliana // Seed Science Research. 2019. V. 29, № 1. P. 12−20.
98. Pozolotina V.N., Antonova E.V., Karimullina E.M. Assessment of radiation impact on Stellaria graminea cenopopulations in the zone of the Eastern Ural Radioactive Trace // Rus J Ecol. 2010. V. 41, № 6. P. 459−468.
99. Antonova E.V., Pozolotina V.N., Karimullina E.M. Viability of plant seed progeny from the East-Ural Radioactive Trace: radiation and weather condition // Genetics, Evolution and Radiation: Crossing Borders, The Interdisciplinary Legacy of Nikolay W. Timofeeff-Ressovsky / Eds Korogodina V.L., Mothersill C., Inge-Vechtomov S.G. et al. Springer, 2016. P. 267–276.
100. Geras'kin S.A., Vasiliev D.V., Kuzmenkov A.G. Specific Features of Scots Pine Seeds Formation in the Remote Period after the Chernobyl NPP Accident // Radiats Biol Radioecol. 2015. V. 55, № 5. P. 539−547 (in Russian).
101. Geras'kin S.A., Kuzmenkov A.G., Vasiliyev D.V. Time dynamics of cytogenetic effects in chronically exposed Scots Pine populations // Radiats Biol Radioecol. 2018. V. 58, № 1. P. 74−84 (in Russian).
102. Schibler U. The daily rhythms of genes, cells and organs. Biological clocks and circadian timing in cells // EMBO Rep. 2005. V. 6, Spec N. P. S9−13.
103. Voitsekhovskaja O.V. Phytochromes and Other (Photo)Receptors of Information in Plants // Russian Journal of Plant Physiology. 2019. V. 66, № 3. P. 351–364.
104. Obroucheva N.V. Transition from hormonal to nonhormonal regulation as exemplified by seed dormancy release and germination triggering // Russian Journal of Plant Physiology. 2012. V. 59, № 4. P. 546−555.
105. Yamaguchi S., Kamiya Y., Sun T.-P. Distinct cell-specific expression patterns of early and late gibberellin biosynthetic genes during Arabidopsis seed germination // The Plant Journal. 2001. V. 28, № 4. P. 443−453.
106. Footitt S., Clay H.A., Dent K. et al. Environment sensing in spring-dispersed seeds of a winter annual Arabidopsis influences the regulation of dormancy to align germination potential with seasonal changes // New Phytologist. 2014. V. 202, № 3. P. 929–939.
107. Fedorova A.I. The function of antioxidants and DNA repair system in cell responses of plants under stress: Yakutsk, 2004. 18 p. (in Russian).
108. Antonova E.V., Pozolotina V.N., Karimullina E.M. Time-dependent changes of the physiological status of Bromus inermis Leyss. seeds from chronic low level radiation exposure areas // Biol Rhythm Res. 2015. V. 46, № 4. P. 587−600.
109. Mazurik V.K., Mikhajlov V.F. Radiation-induced genome instability: the phenomenon, molecular mechanisms, pathogenetical significance // Radiats Biol Radioecol. 2001. V. 41, № 3. P. 272–289 (in Russian).
110. Mothersill C. Expression of delayed toxicity and lethal mutations in the progeny of human cells surviving exposure to radiation and other environmental mutagens // International Journal of Radiation Biology. 1998. V. 74, № 6. P. 673–680.
111. Antonova E.V., Karimullina E.M., Pozolotina V.N. Chronogenic variability of the physiological status of the seed progeny of white campion from the East Ural radioactive trace area // V International Conference «Radioactivity and radioactive elements in the

human environment» / Ed. Rikhvanov L.P. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2016. P. 438–441.
112. Pozolotina V.N., Antonova E.V. Biorhythms as a measure of assessing the impact of chronic exposure on the quality of plant seed progeny // X All-Russian Population Seminar «The Current State and Ways of Development of Population Biology». Izhevsk: KnigoGrad, 2008. P. 297–299.
113. Bartley M.R., Frankland B. Effects on Phytochrome Controlled Germination Produced by Far-Red Irradiation of Seeds before and during Rehydration // Journal of Experimental Botany. 1985. V. 36, № 162. P. 149−158.
114. Thompson K. A Comparative-Study of Germination Responses to High Irradiance Light // Annals of Botany. 1989. V. 63, № 1. P. 159−162.
115. Ballare C.L., Casal J.J. Light signals perceived by crop and weed plants // Field Crops Research. 2000. V. 67, № 2. P. 149−160.
116. Boccalandro H.E., Mazza C.A., Mazzella M.A. et al. Ultraviolet B radiation enhances a phytochrome-B-mediated photomorphogenic response in Arabidopsis // Plant Physiology. 2001. V. 126, № 2. P. 780−788.
117. Biswas K.K., Neumann R., Haga K. et al. Photomorphogenesis of rice seedlings: a mutant impaired in phytochrome-mediated inhibition of coleoptile growth // Plant and Cell Physiology. 2003. V. 44, № 3. P. 242−254.
118. Heschel M.S., Selby J., Butler C. et al. A new role for phytochromes in temperature-dependent germination // New Phytologist. 2007. V. 174, № 4. P. 735−741.
119. Franklin K.A. Light and temperature signal crosstalk in plant development // Current Opinion in Plant Biology. 2009. V. 12, № 1. P. 63–68.
120. Hallett B.P., Bewley J.D. Membranes and seed dormancy: beyond the anaesthetic hypothesis // Seed Science Research. 2002. V. 12, № 02. P. 69−82.
121. Kuzin A.M. Structural and metabolic theory in radiobiology. Moscow: Nauka, 1986. 284 p. (in Russian).
122. Vladimirov Y.A., Archakov A.I. Lipid peroxidation in biological membranes / Ed. Frank G.M. Moscow: Nauka, 1972. 252 p.
123. Footitt S., Douterelo-Soler I., Clay H. et al. Dormancy cycling in Arabidopsis seeds is controlled by seasonally distinct hormone-signaling pathways // Proc Natl Acad Sci U S A. 2011. V. 108, № 50. P. 20236–20241.
124. Molinier J., Oakeley E.J., Niederhauser O. et al. Dynamic response of plant genome to ultraviolet radiation and other genotoxic stresses // Mutation Research-Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis. 2005. V. 571, № 1−2. P. 235−247.
125. Arcanjo C., Armant O., Floriani M. et al. Tritiated water exposure disrupts myofibril structure and induces mis-regulation of eye opacity and DNA repair genes in zebrafish early life stages // Aquatic Toxicology. 2018. V. 200. P. 114−126.
126. Jayasuriya K.M., Baskin J.M., Baskin C.C. Cycling of sensitivity to physical dormancy-break in seeds of Ipomoea lacunosa (Convolvulaceae) and ecological significance // Ann Bot. 2008. V. 101, № 3. P. 341−352.
127. Meyer S.E., Allen P.S. Ecological genetics of seed germination regulation in Bromus tectorum L. II. Reaction norms in response to water stress gradient imposed during seed maturation // Oecologia. 1999. V. 120, № 1. P. 35−43.
128. Meyer S.E., Allen P.S. Ecological genetics of seed germination regulation in Bromus tectorum L. I. Phenotypic variance among and within populations // Oecologia. 1999. V. 120, № 1. P. 27−34.
129. Peters N.C.B., Atkins H.A., Brain P. Evidence of differences in seed dormancy among populations of Bromus sterilis // Weed Research. 2000. V. 40, № 5. P. 467−478.
130. Kolomiitseva I.K. Non-monotonous dose-response relationship in the region of low doses of ionizing radiation // Radiats Biol Radioecol. 2003. V. 43, № 2. P. 179–181 (in Russian).

Сведения об авторах:

Антонова Елена Валерьевна, Институт экологии растений и животных УрО РАН, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории популяционной радиобиологии, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202, selena@ipae.uran.ru (ответственный за переписку с редакцией)

Шималина Надежда Сергеевна, Институт экологии растений и животных УрО РАН, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории популяционной радиобиологии, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202, nadia_malina@mail.ru

Позолотина Вера Николаевна, Институт экологии растений и животных УрО РАН, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией популяционной радиобиологии, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202, pozolotina@ipae.uran.ru

TIME VARIABILITY OF PLANT RESPONSE UNDER CHRONIC EXPOSURE: POSSIBLE APPROACHES TO ASSESSING ADAPTATION TO ABIOTIC STRESS

E. V. Antonova, N. S. Shimalina, V. N. Pozolotina

Institute of Plant and Animal Ecology UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Modern data on the time-varying long-term consequences of the action of ionizing radiation in plants are analyzed. The assessment of radiobiological effects is based on an analysis of absorbed dose rate data and the ICRP reference species concept (Publication 108). The main directions necessary for the development of a methodology for monitoring the state of populations over time have been identified: 1) assessment of transgenerational effects in plants from radioactive contamination areas after stress removal; 2) study of the long-term dynamics of the quality of seed progeny to assess the interaction of radiation and non-radiation factors; 3) comparison of seasonal (intra-annual) rhythms of the physiological and biochemical status of seed progeny maturated in the contaminated areas and beyond. Data analysis allows us to establish some regularities in the formation of adaptive responses of plants over time under the combined influence of different factors, which is necessary to improve the principles of environmental regulation developed in the field of radiation safety.

Key words: plants, oxidative stress, weather conditions, transgenerational effects, biochemical status, perennial and seasonal rhythms.

УДК 621.039.58

ОБЛУЧЕНИЕ НАСЕЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ ВЫБРОСОВ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ АО «ГНЦ НИИАР» В 2020 Г.

А. Б. Авдонина [1], В. Д. Кизин [2]

[1] Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Димитровград, Россия

[2] Акционерное общество «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов», г. Димитровград, Россия

В статье представлены результаты расчетного анализа годовых эффективных доз облучения населения Мелекесского района от выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух при нормальной эксплуатации объектов использования атомной энергии АО «ГНЦ НИИАР». Показано, что в 2020 г. расчетная эффективная доза облучения населения не превысила 2,34 мкЗв, что меньше пренебрежимо малой годовой эффективной дозы облучения – 10 мкЗв. При этом основной вклад в расчетную дозу облучения вносят внешнее облучение от облака и внутреннее облучение при потреблении продуктов питания. Определен список основных дозообразующих радионуклидов (23 нуклида). Показано, что по результатам контроля выбросов в 2020 г. основными дозообразующими радионуклидами были ^{88}Kr, ^{41}Ar и ^{131}I.

Рассчитанная годовая эффективная доза облучения населения за пределами санитарно-защитной зоны АО «ГНЦ НИИАР» составила менее 0,1 % от дозы облучения за счет природных источников, что подтверждает обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в зоне воздействия предприятия АО «ГНЦ НИИАР» при его штатной эксплуатации.

Ключевые слова: эффективная доза облучения, структура дозы, выбросы.

1. Введение

Объектом настоящего исследования является население Мелекесского района, проживающее за пределами санитарно-защитной зоны (СЗЗ) Акционерного общества «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (далее – АО «ГНЦ НИИАР», Институт или НИИАР).

АО «ГНЦ НИИАР» является эксплуатирующей организацией для шести исследовательских ядерных установок, двух критических стендов, отделений реакторного материаловедения, топливных и радиохимических технологий, отделения по производству радионуклидных источников и препаратов, службы-комплекса по обращению с радиоактивными отходами, а также радиационных источников. При этом АО «ГНЦ НИИАР» не производит сбросы радиоактивных веществ в водоемы, радиационное воздействие на население осуществляется только через выбросы радиоактивных веществ в атмосферу [1].

Дозовые нагрузки на население, создаваемые за счет выбросов и сбросов радиоактивных веществ в атмосферу и водоемы, являются основными показателями демонстрирующими безопасность объектов использования атомной энергии. Для объектов использования атомной энергии (в т. ч. и для НИИАР) устанавливаются нормативы предельно допустимых выбросов, при непревышении которых дозы

облучения населения будут пренебрежимо малы. Однако для анализа достигнутого уровня радиационной безопасности и его совершенствования необходимо проведение расчета доз облучения населения за счет газоаэрозольных выбросов. Это и является основной целью настоящей работы.

2. Материалы и методы

В качестве исходных данных о величинах выброса АО «ГНЦ НИИАР» в настоящей работе были использованы сведения из открытых литературных источников. Расчет доз облучения населения проведен по методике, изложенной в РБ-106-21 «Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух» [2].

Выбросы радиоактивных веществ, образующиеся на предприятии АО «ГНЦ НИИАР», осуществляются в основном централизованно после очистки через высотную трубу единого вентиляционного центра и формируются за счет радиоактивных веществ, выбрасываемых при эксплуатации реакторных установок МИР.М1, БОР-60, ВК-50, СМ-3, РБТ-6, РБТ-10/2, материаловедческих, радиохимических и химико-технологических лабораторий. Состав выбросов представлен инертными радиоактивными газами (далее – ИРГ), альфа-, бета-излучающими аэрозолями, включающими изотопы плутония, цезий-137, стронций-90. Высота источника выбросов – 120 м, диаметр устья – 5,5 м, средний расход воздуха около 200 $м^3/с$ [1, 3].

Текущий контроль активности поступлений радиоактивных веществ в атмосферу осуществляется гамма-спектрометрическим методом; альфа-излучающих аэрозолей (изотопов плутония) и бета-излучателей $^{89,90}Sr$ – путем радиохимической подготовки проб и измерением радиометрическим методом и расчетом величины активности поступлений. Отбор аэрозольных проб осуществляется на сложные аналитические фильтры на основе фильтров АФА-РСП-20 и угольных фильтров СФЛ-И (угольный фильтр с импрегнированным серебром). Оперативный контроль активности радиоактивных газов, альфа-, бета-излучающих аэрозолей и изотопов ^{131}I осуществляется стационарной системой непрерывного контроля. Сведения о выбросах радиоактивных веществ в атмосферный воздух при эксплуатации объектов использования атомной энергии АО «ГНЦ НИИАР» в 2020 г. заимствованы из работ [1, 4]. Параметры атмосферы и метеорологические характеристики площадки размещения предприятия заимствованы из работы [5].

Расчеты доз облучения населения проведены в разработанном авторами программном комплексе, реализующем методические подходы РБ-106-21 [2], для следующих путей радиационного воздействия:

- внешнее облучение от облака;
- внутреннее облучение при поступлении радиоактивных веществ с продуктами питания;
- внутреннее облучение при ингаляции радиоактивных веществ;
- внешнее облучение от поверхности с осажденными радиоактивными веществами.

При расчетах доз внутреннего облучения при потреблении пищевых продуктов, загрязненных радиоактивными веществами, принято, что в рационе населения присутствуют только продукты местного производства (мясо, молоко, овощи).

3. Результаты

В 2020 г. активность поступлений радионуклидов в атмосферный воздух не превышала величин нормативов допустимого выброса и была на несколько порядков ниже величин нормативов предельно допустимого выброса. Суммарная активность выбросов радиоактивных веществ составила $4{,}13 \cdot 10^{15}$ Бк, основной вклад в активность вносили инертные радиоактивные газы (ИРГ). Суммарный выброс бета-гамма-излучающих аэрозолей составил $1{,}76 \cdot 10^{11}$ Бк, суммарный выброс альфа-излучающих аэрозолей – $1{,}73 \cdot 10^{8}$ Бк. Фактические поступления радиоактивных веществ в атмосферный воздух составили 16 % от разрешенной суммарной величины [1]. При этом в динамике выброса по сравнению с предыдущим годом наблюдается как увеличение активности для отдельных радионуклидов (^{134,137,138}Cs, ^{54}Mn, ^{90}Sr, ^{125}Sb, ^{82}Br, ^{88,89}Rb, ^{241}Am, ^{139}Ba, ^{60}Co, ^{154,155}Eu, ^{24}Na, ^{242,244}Cm), так и снижение активности выброса для остальных радионуклидов. Такая динамика обусловлена изменением объема материаловедческих исследований, производства радионуклидных источников и препаратов, научно-исследовательских работ, а также особенностями работы исследовательских ядерных установок Института [1, 4].

Рассчитанная годовая эффективная доза облучения отдельных лиц из населения за счет деятельности АО «ГНЦ НИИАР» в 2020 г. не превысила 2,34 мкЗв, что меньше пренебрежимо малой дозы 10 мкЗв в год [7] и установленной для АО «ГНЦ НИИАР» квоты дозы облучения населения за счет газоаэрозольных выбросов 70 мкЗв [1].

Структура годовой эффективной дозы облучения населения следующая (рис. 1): основной вклад в дозу облучения вносят внешнее облучение от облака (73 %, основные нуклиды ^{88}Kr, ^{41}Ar) и внутреннее облучение при потреблении продуктов питания (21 %, основные нуклиды ^{131,133}I, ^{24}Na). Ингаляционный путь дает 4 % в суммарную дозу облучения (в основном за счет альфа-излучающих нуклидов), облучение от поверхности – 2 % (^{60}Co, ^{125}Sb, ^{134,137}Cs, ^{54}Mn, ^{65}Zn).

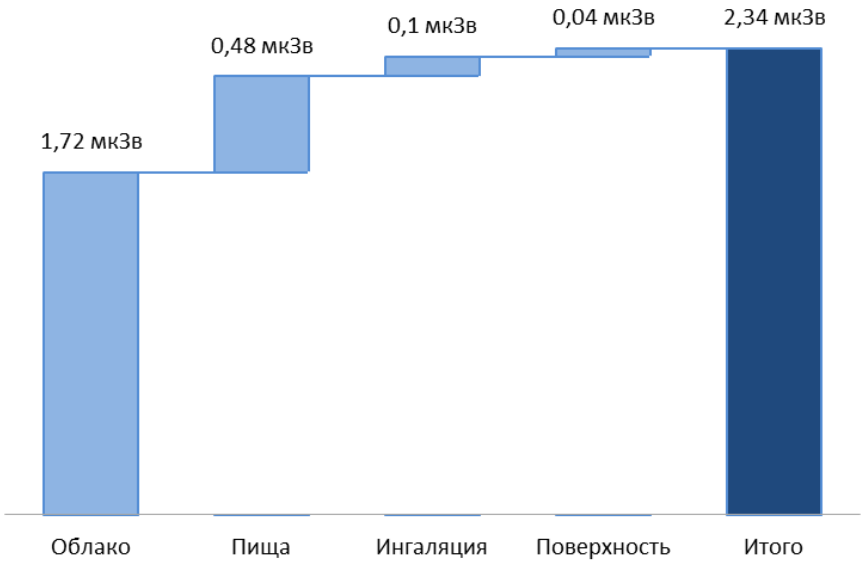


Рисунок 1. Структура дозы облучения населения г. Димитровграда в зависимости от путей облучения за счет деятельности АО «ГНЦ НИИАР» в 2020 г.

При этом, несмотря на определяющий (более 99,99 %) вклад в суммарную активность ИРГ, вклад инертных радиоактивных газов в годовую дозу облучения населения составил около 73 %, вклад бета-гамма-аэрозолей составил 22 % (в т. ч.

для изотопа йода-131 – 15 %), вклад альфа-излучающих аэрозолей составил 4 % (рис. 2). Вклад трития в дозу облучения населения составил менее 0,5 %, контроль активности ^{14}C в выбросах радиоактивных веществ в АО «ГНЦ НИИАР» в 2020 г. не проводился.

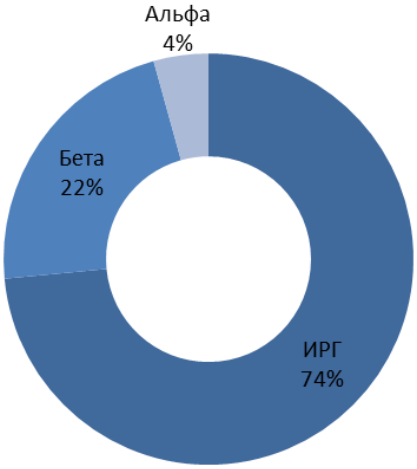


Рисунок 2. Вклад отдельных групп радионуклидов в суммарную дозу облучения

Основные радионуклиды, дающие 99 % вклад в дозу облучения населения за счет деятельности предприятия в 2020 г.: ^{88}Kr, ^{41}Ar, ^{131}I, ^{135}Xe, ^{87}Kr, ^{138}Xe, ^{133}I, ^{239}Pu, ^{133}Xe, ^{24}Na, ^{135m}Xe, ^{238}Pu, ^{60}Co, ^{85m}Kr, ^{88}Rb, ^{134}Cs, ^{3}H, ^{125}Sb, ^{242}Pu, ^{244}Cm, ^{137}Cs, ^{243}Am и ^{90}Sr (всего 23 радионуклида – см. рис. 3).

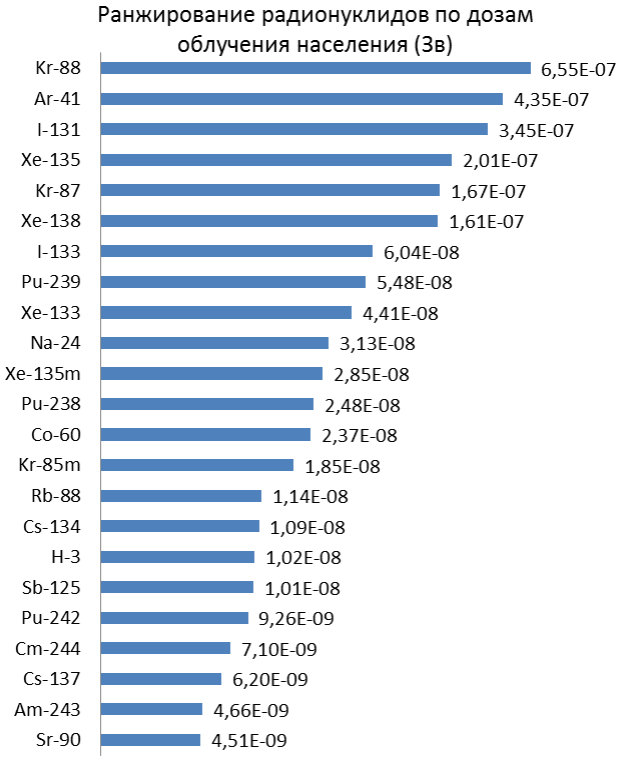


Рисунок 3. Рассчитанные годовые эффективные дозы (Зв) для дозообразующих радионуклидов по результатам радиационного контроля выбросов в 2020 г.

В соответствии с РБ-106-21 [2] для данных радионуклидов должны устанавливаться нормативы предельно допустимого выброса радиоактивных веществ и контролироваться их непревышение.

4. Обсуждение

Рассчитанные значения доз облучения населения Мелекесского района за счет деятельности АО «ГНЦ НИИАР» являются консервативными: предприятие проводит регламентный радиационный контроль продуктов питания, по результатам которого не обнаруживается отличного от фонового содержания радиоактивных веществ [1].

Рассчитанная годовая эффективная доза облучения населения в 2020 г. составила менее 0,1 % от дозы облучения населения за счет естественных (природных) источников (в среднем для Ульяновской области – 2,4 мЗв в год). Таким образом, на основании проведенных расчетов подтверждена радиационная безопасность для населения, проживающего в зоне воздействия предприятия АО «ГНЦ НИИАР» при его штатной эксплуатации.

Рассчитанные значения доз облучения населения согласуются с результатами аналогичных работ [3, 6]. При этом результаты [6] ниже результатов настоящей работы в 2 – 3 раза, что может быть обусловлено как использованием в настоящей работе более консервативных моделей (РБ-106-21 [2], в то время как авторы [6] применяли созданные в ИБРАЭ РАН программно-технические средства, в т. ч. используемые при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу в модели «ПРОЛОГ»), так и различиями в исходных данных (метеопараметры и радионуклидный состав выброса радиоактивных веществ). С результатами работы [3] согласие полученных в настоящей работе результатов более точное: по результатам расчетов авторов [3] дозы облучения населения г. Димитровграда за счет деятельности НИИАР составили порядка 2,5 мкЗв (после снижения активности выбросов радиоактивных веществ при вводе в эксплуатацию системы УПАК на реакторной установке ВК-50).

Следует отметить, что в список критических нуклидов по сравнению с результатами [3] вошли изотопы ^{88}Kr (выбросы обусловлены работой реакторных установок Института) и ^{131}I (выбросы обусловлены в основном производством радионуклидных источников ^{99}Mo).

Для уточнения особенностей и характеристик радиационного воздействия на население выбросов радиоактивных веществ целесообразно продолжить аналогичные ретроспективные исследования по результатам контроля выбросов за другие отчетные годы.

5. Выводы

Анализ годовых эффективных доз облучения населения Мелекесского района за пределами СЗЗ от выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух при нормальной эксплуатации объектов использования атомной энергии АО «ГНЦ НИИАР» показал, что в 2020 г. расчетная эффективная доза облучения населения не превысила 2,34 мкЗв, что меньше пренебрежимо малой годовой эффективной дозы облучения 10 мкЗв. Подтверждено, что основной вклад в расчетную дозу облучения в 2020 г. вносили внешнее облучение от облака и внутреннее облучение при потреблении продуктов питания.

На основании проведенных расчетов подтверждена радиационная безопасность для населения, проживающего в зоне воздействия предприятия АО «ГНЦ НИИАР», в ситуации воздействия выбрасываемой в атмосферный воздух газоаэрозольной смеси при нормальной эксплуатации.

6. Список литературы

1. Отчет по экологической безопасности за 2020 год. Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2021. 75 с. Режим доступа: URL: http://niiar.ru/annual_report (27.04.2022).
2. Об утверждении руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному и атомному надзору от 30 августа 2021 г. № 288: РБ-106-21. – Москва, 2021. Режим доступа: в открытом доступе. URL: https://docs.secnrs.ru/catalog/RB/RB_106_21/ (дата обращения: 27.04.2022).
3. Кириллович А.П., Кобзарь И.Г., Лосев В.П., Скиба О.В., Кочетков О.А., Павловский О.А., Цветков В.И. Радиоактивные выбросы НИИАРа и расчет дозовых нагрузок на население, проживающее в 100-км зоне // Атомная энергия. 1992. Т. 72. Вып. 3. С. 282-285.
4. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2020 году: ежегодник. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2021. Режим доступа: URL: http://egasmro.ru/ru/data (27.04.2022).
5. Соболев А.М., Солодовникова Л.Н. Климатические характеристики района Научно-исследовательского института атомных ректоров по результатам измерений // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». 2017. № 1. С. 43-56.
6. Аракелян А.А., Ведерникова М.В., Гаврилина Е.А., Печкурова К.А. Оценка вклада Государственного научного центра «НИИ атомных реакторов» в формирование техногенных рисков для населения Димитровграда // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. №. 3. С. 13-19.
7. НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.

Сведения об авторах:

Авдонина Анна Борисовна, Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (ДИТИ НИЯУ МИФИ), аспирант, ул. Куйбышева, 294, г. Димитровград, Ульяновская область, 433511, j-annja@mail.ru

Кизин Виктор Дмитриевич, Акционерное общество «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ул. Западное шоссе, 9, г. Димитровград, Ульяновская область, 433510.

POPULATION EXPOSURE DUE TO RADIOACTIVE EMISSIONS OF JSC "SSC RIAR" IN 2020

A. B. Avdonina [1], V. D. Kizin [2]

[1] *Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the National Research Nuclear University MEPhI (DETI MEPhI), Dimitrovgrad, Russian Federation*
[2] *Joint Stock Company «State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors» (JSC "SSC RIAR"), Dimitrovgrad, Russian Federation*

The results of a computational analysis of the annual effective exposure doses of the population of the city of Dimitrovgrad from emissions of radioactive substances into the atmospheric air during normal operation of nuclear facilities of JSC "SSC RIAR" are presented. It is shown that in 2020 the calculated effective dose to the population did not exceed 2.34 μSv, which is less than the negligible annual effective dose of 10 μSv. The main contribution to the calculated dose of exposure is made by external exposure from the cloud and internal exposure from food consumption. A list of the main dose-forming radionuclides (23 nuclides) has been determined. It is shown that according to the results of monitoring emissions in 2020, the main dose-forming radionuclides are ^{88}Kr, ^{41}Ar and ^{131}I.

The calculated annual effective exposure dose to the population of the city of Dimitrovgrad is less than 0.1% of the exposure dose to the population due to natural sources, which confirms the radiation safety of the population living in the impact zone of JSC "SSC RIAR" during its normal operation.

Key words: effective radiation dose, radiation dose structure, emissions

References

1. Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti za 2020 god. Dimitrovgrad: AO "GNTS NIIAR", 2021. (In Russian).
2. Sobolev A.M., Solodovnikova L.N. Klimaticheskie kharakteristiki rayona Nauchno-issledovatel`skogo instituta atomnykh rektorov po rezul`tatam izmereniy. Sbornik trudov AO "GNTS NIIAR". 2017. № 1. P. 43-56. (In Russian).
3. Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel`nykh gosudarstv v 2020 godu: ezhegodnik. Obninsk: FGBU "NPO "Tayfun", 2021. (In Russian).
4. Kirillovich A.P., Kobzar` I.G., Losev V.P., Skiba O.V., Kochetkov O.A., Pavlov-skiy O.A., TSvetkov V.I. Radioaktivnye vybrosy NIIAR i raschet dozovykh nagruzok na naselenie, prozhivayushchee v 100-km zone. Atomnaya energiya. 1992. T. 72. V. 3. P. 282-285. (In Russian).
5. Ob utverzhdenii rukovodstva po bezopasnosti pri ispol`zovanii atomnoy energii "Rekomenduemye metody rascheta parametrov, neobkhodimykh dlya razrabotki i ustanovleniya normativov predel`no dopustimykh vybrosov radioaktivnykh veshchestv v atmosfernyy vozdukh": prikaz Federal`noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu i atomnomu nadzoru ot 30 avgusta 2021 g. № 288: RB-106-21. Moskva. 2021. (In Russian).
6. Arakelyan A.A., Vedernikova M.V., Gavrilina E.A., Pechkurova K.A. Otsenka vklada Gosudarstvennogo nauchnogo tsentra "NII atomnykh reaktorov" v formirovanie tekhnogennykh riskov dlya naseleniya Dimitrovgrada. Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost`. 2020. № 3. P. 13-19. (In Russian).
7. NRB-99/2009. Normy radiatsionnoy bezopasnosti. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy. M.: Federal`nyy tsentr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2009. (In Russian).

УДК 543.51

УСКОРИТЕЛЬНАЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

Е. В. Пархомчук[1,3,4], А. В. Петрожицкий[1,2,3], М. М. Игнатов[1,3], Д. В. Кулешов[1,3], П. Н. Калинкин[4], Е. А. Прокопьева [1,5], Л. А. Кутнякова[3], В. В. Пархомчук[1,2]

[1] Новосибирский государственный университет, ЦКП «УМС НГУ-ННЦ», г. Новосибирск, Россия, 630090

[2] ФГБУН Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, 630090

[3] ФГБУН Институт археологии и этнографии СО РАН, г. Новосибирск, Россия, 630090

[4] ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН», г. Новосибирск, Россия, 630090

[5] ФГБНУ Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины, г. Новосибирск, Россия, 630117

В статье кратко рассмотрены биомедицинские приложения метода ускорительной масс-спектрометрии (УМС). В зарубежной практике — это определение массобаланса и исследования ADME/AME; профилирование метаболитов лекарственных средств или ксенобиотиков в сочетании с методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ); исследование фармакокинетики ксенобиотиков или лекарственных препаратов на ранних стадиях разработки с помощью метода микродоз; определение уровня цитотоксичности веществ. Приведены примеры биомедицинских экспериментов, проведенных на Уникальной научной установке УМС ИЯФ СО РАН: исследование кинетики выведения меченного ^{14}C метанола и его метаболитов из различных органов мышей и воздействия на живой организм аэрозольных частиц (микро- и наносфер из меченного ^{14}C полистирола) при низких концентрациях; опробован способ обнаружения в организме бактерии Helicobacter pylori с использованием меченной ^{14}C мочевины и предложен способ регистрации ультрамалых концентраций вирусов.

Возможности УМС в регистрации радиоуглерода составляют 1 атом ^{14}C на 10^{12} – 10^{15} атомов ^{12}C. Такая высокая чувствительность позволяет сдвинуть порог обнаружения интересующих веществ, меченных ^{14}C, в область более низких концентраций, недоступных для традиционных методов, применявшихся ранее. Поэтому открывается возможность использования субфармакологических доз препаратов. С одной стороны, такие малые дозы могут считаться безопасными для здоровья человека, а с другой – дают раннее представление о реакции человеческого организма на исследуемые вещества. При этом радиоактивность меченых препаратов, необходимая для точной регистрации методом УМС, в несколько раз меньше естественного уровня радиации и не представляет угрозы для здоровья. Это ускоряет разработку лекарственных средств.

Ключевые слова: ускорительная масс-спектрометрия, радиоуглерод, биомедицина, разработка лекарств, исследования ADME/AME, профилирование метаболитов, микродозирование, определение цитотоксичности.

1. Введение

Методом ускорительной масс-спектрометрии (УМС), появившемся в 70-е гг. XX в., можно измерять содержание в образце долгоживущих космогенных и антропогенных изотопов, таких как ^{10}Be, ^{14}C, ^{26}Al, ^{129}I [1, 2]. Наибольший интерес для медицинских исследований представляют возможности УМС в регистрации радиоуглерода − ^{14}C, при этом точность метода, основанного на поштучном подсчете атомов, настолько высока, что позволяет проводить достоверные измерения концентрации изотопа ^{14}C при его доле 10^{-15} от общего содержания углерода [3]. Непревзойденная чувствительность УМС дает ряд преимуществ, таких как малое количество пробы для анализа и возможность анализа углеродсодержащего образца, находившегося в любом агрегатном состоянии. Поэтому для УМС-анализа в наиболее простом исполнении потребуется около 2–4 мг сухого вещества, 10 мг образца биологических тканей и менее 50 мкл жидкости. Известны УМС-исследования с образцами, содержащими менее 1 мкг углерода [4]. К недостаткам метода с точки зрения биомедицинских приложений можно отнести: использование меченных ^{14}C препаратов, высокие операционные затраты и стоимость прибора, сложную процедуру пробоподготовки, включающую выделение углекислого газа из образца и его зауглероживание, а также малую осведомленность исследователей об этой инновационной технологии. Однако ввиду крайне малого содержания радиоуглерода в биосфере – соотношение ^{14}C/^{12}C составляет всего лишь 10^{-12} − радиоактивность меченых препаратов, необходимая для точной регистрации методом УМС, в несколько раз меньше естественного уровня радиации. Это позволяет безопасно проводить многократные исследования, в т. ч. с привлечением детей в качестве испытуемых, что очень важно при разработке именно детских лекарств в связи с существенными различиями обмена веществ у взрослых и детей [5, 6]. Кроме того, за 50 лет развития ускорительные масс-спектрометры превратились из крупногабаритных машин в относительно компактные и стабильно функционирующие приборы, доступные небольшим исследовательским центрам. Разработаны системы прямого УМС-анализа углекислого газа, получаемого из микроскопических образцов, а также графитизаторы с возможностью подготовки больших партий проб для УМС-анализа из биологических тканей. До 2013 г. в мире функционировало около 100 установок УМС, сосредоточенных преимущественно в Северной Америке, западной Европе, Корее и Японии [2], а в течение следующих 20 лет только одной швейцарской компанией Ionplus было произведено и продано еще около 30 ускорительных комплексов, поступивших в основном в организации Европы и Китая. Большая часть установок УМС используется для проведения радиоуглеродного датирования археологических объектов. Первые исследования ксенобиотиков и лекарственных средств с применением УМС появились в 2000-х гг. и затем продолжили свой путь в токсикологии, предклинической фармакологии, фазах 0 и 1 клинических испытаний лекарств, науке о питании и др. [7, 8].

В России первый ускорительный масс-спектрометр был создан и запущен Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) в 2011 г. в Новосибирске и в течение последующих 10 лет представлял собой единственный в России УМС [9]. В настоящее время он зарегистрирован как Уникальная научная установка (УНУ) «УМС ИЯФ СО РАН»[1]. Для получения графитизированных катодов из тестируемых образцов для УНУ УМС ИЯФ сотрудниками Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН (ИК СО РАН) была разработана абсорбционно-каталитическая установка, давшая хорошую производительность и достаточную для

[1]https://www.inp.nsk.su/nauka/issledovatelskaya-infrastruktura/nauchnye-ustanovki/uskoritelnyj-mass-spektrometr

радиоуглеродного датирования чистоту проб (собственный фон установки составляет 0,8–1 % от современного уровня ^{14}C) [10]. В отличие от зарубежных графитизаторов [11] разработанная система позволяет быстро и недорого получать качественные зауглероженные пробы от нетипичных объектов, например высокосернистых материалов (тяжелые нефти, уголь и др.), углеродсодержащих газов, биологических тканей, вирусов, органических аэрозольных частиц [12–16].

В 2019 г. Министерством образования и науки РФ был приобретен и предоставлен Новосибирскому государственному университету (НГУ) относительно компактный УМС швейцарского производства – MICADAS. В 2020 г. ресурсы четырех организаций, необходимые для проведения фундаментальных и прикладных научных исследований с использованием УМС, подготовки высококвалифицированных кадров и оказания услуг заинтересованным пользователям, были объединены в единое подразделение − ЦКП «Ускорительная масс-спектрометрия НГУ-ННЦ»[2], на английском – AMS Golden Valley[3]. Помимо НГУ, функционирование ЦКП обеспечивается также ИЯФ СО РАН, Институтом археологии и этнографии СО РАН (ИАЭТ СО РАН) и ИК СО РАН. Рассмотрим некоторые примеры различных биомедицинских исследований с использованием УМС из зарубежной и российской практики.

2. Направления использования УМС в биомедицине

Прежде чем приводить примеры использования радиоуглеродного анализа в биомедицинских исследованиях, нельзя не упомянуть об уникальном явлении, случившемся на Земле впервые за последние как минимум 50 тысяч лет. Это резкое двукратное повышение уровня радиоуглерода в биосфере в результате интенсивных ядерных испытаний в период холодной войны[4], в т. ч. зарегистрированное в годичных кольцах деревьев с 1955 г., и экспоненциальный спад концентрации ^{14}C, начиная с 1963 г., после подписания ведущими странами − СССР, США и Великобританией − Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой (Московского договора) [3,17]. В 2005 г. международная группа ученых из Швеции и США предложила использовать эту непроизвольную радиоуглеродную метку для исследования времени жизни различных клеток в организме человека, измеряя концентрацию радиоуглерода в генетическом материале клеток с помощью УМС [18]. Они выделили ДНК из клеток кишечника, коры головного мозга и мозжечка взрослых людей и показали, что время жизни неэпителиальных клеток кишечника составляет 15,9 лет, а содержание радиоуглерода в клетках мозжечка соответствует уровню года рождения человека, имеющего возраст 34,8 лет, при этом клетки коры головного мозга оказались существенно моложе клеток мозжечка (более чем на 5 лет), тем самым демонстрируя более высокую скорость регенерации клеток.

В настоящее время основные медицинские направления использования УМС − это получение массового баланса ксенобиотика или разрабатываемого лекарственного средства во время клинических испытаний [19], в т. ч. в исследованиях ADME (absorption, distribution, metabolism, and excretion) или AME (absorption, metabolism, and excretion) [20, 21]; профилирование метаболитов при сочетании с методом ВЭЖХ [22], т. е. получение прямых данных о метаболизме лекарственного средства или ксенобиотика [23]; исследование фармакокинетики ксенобиотика или лекарственных препаратов на ранних стадиях разработки с

[2] https://www.nsu.ru/n/research/divisions/physics/3004154/

[3] https://radiocarbon.webhost.uits.arizona.edu/node/11

[4] https://www.youtube.com/watch?v=LLCF7vPanrY

помощью метода микродоз (1/100 от дозы, обеспечивающей фармакологическое действие, или менее 100 мкг) [23−27]; определение уровня цитотоксичности вещества, в частности, подбор лекарственной дозы в противораковой терапии [28, 29].

2.1 Определение массобаланса и исследования ADME/AME

Раннее выявление свойств абсорбции, распределения, метаболизма и выделения (ADME) молекулы-кандидата нового лекарства имеет решающее значение для его успешной разработки. Исследование массобаланса с использованием радиоактивно меченных молекул широко используется для определения степени абсорбции и распределения по метаболитам, для исследования маршрутов выделения, а также для выявления циркуляторных и экскреторных метаболитов [19]. Обычно такие исследования сначала проводят на лабораторных животных – крысах, однако результаты, полученные на крысах, не всегда можно перенести на человека, поскольку метаболизм веществ у людей сложнее и более изменчивый, чем у селекционных лабораторных животных. Люди и крысы имеют различную регуляцию желчных кислот, у крыс отсутствует желчный пузырь и имеется ряд других анатомических отличий, поэтому лекарства, которые преимущественно выводятся с желчью, имеют разные фармакокинетические (ФК) характеристики у крыс и людей. Кроме того, при выявлении массобаланса у животных используется высокая радиоактивность, например, 1–2 МБк для крыс или 5–10 МБк для собак, непригодные для систематических исследований на человеке. При испытаниях меченого лекарственного препарата на людях большую популярность приобрел метод microtracing, когда радиоактивность препарата, вводимого в человека в фармакологической дозе, составляет менее 1000 нКи или 0,037 МБк. При этом концентрация метки в собранных образцах может быть надежно определена только с помощью ускорительной масс-спектрометрии [30].

Корейские авторы [19] применили данный подход для исследований массобаланса KD101, единственного изомера эфирного масла [(-)-α-цедрен)], выделяемого из Juniperus virginiana (кедрового дерева), который находится в фазе клинических испытаний для лечения ожирения у людей. Профили абсорбции, метаболизма и выделения KD101 были оценены с помощью УМС на людях после однократного перорального введения KD101 в дозе 400 мг совместно с микродозой ^{14}C-KD101 ~35,2 мкг при общей радиоактивности 6,81 кБк. Среднее общее восстановление введенной радиоактивности составило 85,2 % с преимущественной экскрецией с мочой (78,0 %) в течение 48 часов после приема препарата. Отмечена существенная разница с метаболизмом KD101 у крыс, у которых восстановление радиоактивности составило 97,6 %, при этом только 28,7 % выводилось с мочой и 66,4 % − с калом. На основании исследования авторами [19] предложены маршруты абсорбции, метаболизма и выделения KD101 у крыс и людей, необходимые для дальнейшего внедрения лекарства.

В работе [21] изучали абсорбцию, метаболизм и выведение омариглиптина (MARIZEV®) − ингибитора ДПП-4, одобренного в Японии для лечения сахарного диабета 2 типа, путем приема один раз в неделю. Эксперимент проводили следующим образом: шесть здоровых добровольцев получили однократно перорально дозу 25 мг (2,1 мкКи) [^{14}C]-омариглиптина, и затем в течение 20 дней отбирались образцы крови, плазмы, мочи и кала, концентрацию ^{14}C в которых определяли методом УМС. Выяснилось, что [^{14}C]-омариглиптин быстро всасывался, пиковые концентрации в плазме наблюдались через 0,5−2 часа после приема. Большая часть ^{14}C была выделена с мочой (~74,4 %), меньшая часть выводилась с калом (~3,4 %). Омариглиптин был основным компонентом мочи (~89 % радиоактивности мочи), что указывает на почечную экскрецию неизмененного

препарата в качестве основного механизма клиренса, на омариглиптин приходилась почти вся циркулирующая радиоактивность в плазме [21].

2.2. Профилирование метаболитов

В конце 90-х гг. появилась идея объединения УМС и ВЭЖХ, успешную реализацию которой продемонстрировали в работе [31]. Она была посвящена изучению метаболитов атразина − гербицида из класса хлортриазинов (используется для борьбы с широколиственными сорняками), выделенных с мочой после введения вещества взрослым мужчинам-добровольцам путем кожной аппликации. ВЭЖХ использовалась для выяснения времени выхода возможных метаболитов из хроматографической колонки и получения спектра идентифицированных веществ из модельной смеси, а также для разделения экспериментальных смесей, получаемых из образцов мочи. Метод УМС использовали для количественной оценки метаболитов атразина по спектру, получаемому на той же колонке и в тех же условиях, но не путем регистрации УФ-поглощения, а путем измерения соотношения $^{14}C/^{12}C$ в зависимости от времени выхода вещества при введении исходного вещества в недетектируемой ВЭЖХ дозе. Меченый в кольцевых положениях ^{14}C-атразин наносился на 24 часа в виде кожного пластыря добровольцам в низкой (0,167 мг, 6,45 мкКи) и высокой (1,98 мг, 24,7 мкКи) дозах, моча собиралась в течение 7 дней. Оказалось, что меркаптуратные метаболиты атразина и деалкилированный атразин доминировали в ранний период метаболизма и составляли примерно 90 % ^{14}C в моче, при этом исходное вещество не выделялось. Со временем метаболиты атразина становились более полярными, и был зафиксирован неидентифицированный полярный метаболит, присутствовавший во всех образцах через несколько дней после воздействия. Таким образом, была продемонстрирована прекрасная возможность с помощью УМС и ВЭЖХ проводить мониторинг ксенобиотиков и лекарственных препаратов, попадающих в организм в ничтожных нерегистрируемых традиционными методами дозах. Идея получила широкое развитие и в настоящее время используется в различных направлениях биологического, медицинского и экологического профиля [6, 24].

2.3. Метод микродозирования

В прошлом веке клинические этапы испытаний новых разрабатываемых лекарств отличались непроизводительностью и требовали больших расходов. Вывод нового лекарства на рынок занимал 10–12 лет с момента открытия молекулы и стоил от 0,8 до 1,2 млрд долл. США [25]. Особую трудность вызывала разработка лекарств для лечения заболеваний центральной нервной системы и противораковых препаратов. Около 80 % разрабатываемых лекарств не доходили до коммерческого продукта из-за проблем с эффективностью, безопасностью или токсичностью. Для преодоления данной проблемы было предложено использовать на ранних стадиях разработки лекарственного средства (перед началом фазы-1 клинических испытаний) метод микродозирования непосредственно на людях-добровольцах, при котором вводят субфармакологическую дозу − 1/100 от дозы, обеспечивающей фармакологическое действие, или менее 100 мкг. С одной стороны, такие малые дозы могут считаться безопасными для здоровья человека, а с другой – дают раннее представление о реакции человеческого организма к соединениям-кандидатам и могут повысить продуктивность разработки лекарств. После проведения тщательных исследований метода микродозирования на ряде веществ страны Евросоюза и США ввели рекомендации к его использованию при разработке новых лекарственных средств с 2004 и 2006 г. соответственно [32, 33]. Очевидно, что метод УМС предоставляет

уникальные аналитические возможности при использовании микродозирования. Применимость методов была продемонстрирована при выполнении крупных международных проектов, в которых участвовали фармацевтические компании, научно-исследовательские институты и университеты: Consortium for Resourcing and Evaluating AMS Microdosing (CREAM) и EU Microdosing AMS Partnership Programme (EUMAPP) [25].

2.4. Определение уровня цитотоксичности

В Ливерморской национальной лаборатории Лоуренса объединили систему УМС-анализа углекислого газа с комплексом ВЭЖХ для оценки степени связывания лекарственного средства с мишенью в качестве биомаркера ответа на химиотерапию [29]. Объединение УМС-анализа CO_2 и ВЭЖХ позволило разделить жидкую смесь на компоненты, получить чистый углекислый газ из каждого отдельного компонента и провести УМС-анализ ^{14}C в количестве $50 \cdot 10^{-21}$ моль ($7 \cdot 10^{-19}$ г), т. е. около 1 мкг компонента, с точностью не ниже ±5 %.

Препараты платины цисплатин, карбоплатин и оксалиплатин относятся к числу часто назначаемых химиотерапевтических препаратов и используются против широкого спектра опухолей, таких как рак мочевого пузыря, легких, яичников и толстой кишки. Однако эффективность химиотерапии на основе платины ограничена из-за серьезных побочных эффектов и врожденной или приобретенной лекарственной устойчивости. До настоящего времени
клинически полезные тесты для прогнозирования резистентности организма до начала химиотерапии практически отсутствовали. Основным механизмом действия препаратов платины является ковалентная модификация (повреждение) геномной ДНК (формирование аддуктов), которая инициирует гибель клеток посредством индукции апоптоза или некроза (рис. 1).

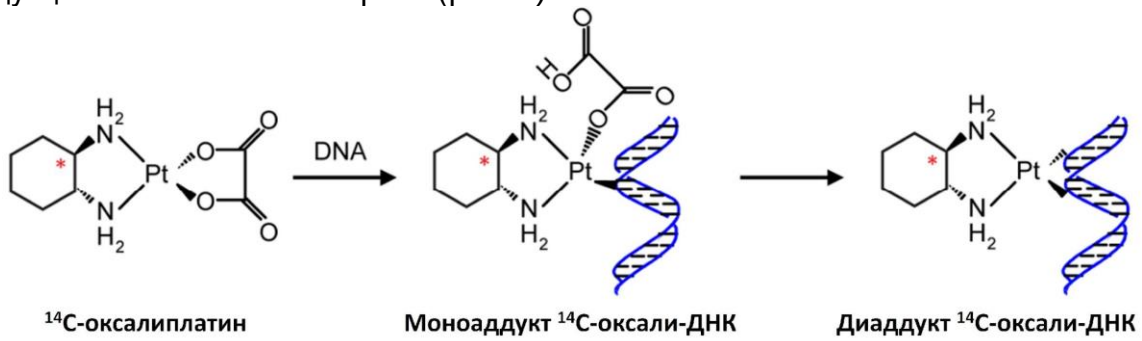


Рисунок 1. Схема формирования аддуктов препарата платины с ДНК, приводящих к гибели клетки [29]

Количественная оценка концентрации аддуктов дает важнейшую информацию о цитотоксичности препарата. Однако из-за недостаточной чувствительности имеющихся стандартных методов обнаружения (например, ИСП-МС и иммуноанализ) уровень аддуктов в клетках измеряется только после воздействия высоких, терапевтически значимых концентраций лекарственных средств. Применяя УМС, ввели в медицинскую практику подход, называемый диагностическим микродозированием, который позволяет изучать фармакокинетику и фармакодинамику платиновых препаратов после введения субтерапевтических доз, не оказывающих побочного воздействия на организм. С помощью УМС можно измерить одну молекулу лекарства, меченную ^{14}C, связанную с ДНК из 10^8 нуклеотидов, причем предел обнаружения – один аддукт на 10^{12} нуклеотидов.

Процедура диагностической методики заключается в следующем. Пациентам с раком вводят одну микродозу ^{14}C-меченого карбоплатина − в 100 раз ниже ожидаемой терапевтической дозы. Образцы крови и тканей отбирают в течение 24 часов и определяют уровень аддукта карбоплатин-ДНК с помощью УМС. Повышая дозу, определяют уровень побочных реакций и степень разрушения опухоли. Такой подход позволяет подобрать действенную дозу токсичного препарата, минимизируя вредные побочные эффекты лекарства [29].

В работе 2021 г. [28] представлены результаты использования УМС для количественной оценки включения азацитидина (Aza) в ДНК и РНК в клетках острого миелоидного лейкоза (ОМЛ) человека, костного мозга мыши (КМ) и мононуклеарах периферической крови (МКПК). Азацитидин, аналог нуклеозида цитидина, используется для лечения миелодиспластических синдромов (МДС) и ОМЛ. УМС-метод позволил количественно определить всего одну молекулу азацитидина, включенную в ДНК МКПК, из примерно $2\cdot10^7$ нуклеотидов. На лабораторных мышах *in vivo* был установлен нижний предел количественного определения азацитидина, включенного в ДНК/РНК в МКПК (~ $3{,}7\cdot10^5$) и КМ (~ 27,8 мг), собранных через 24 часа после введения дозы, равной 18 нКи/мышь (1 мг/кг азацитидина). Нижний предел обнаружения для анализа МКПС составил 2,5 пикограмма на микрограмм (пг-экв/г) ДНК и 0,22 пг-экв/г РНК, а для анализа КМ – 1,7 пг-экв/г ДНК и 0,22 пг-экв/г РНК. Была установлена линейная зависимость УМС-сигнала (т. е. отношения $^{14}C/^{12}C$ в диапазоне от $2{,}45\cdot10^{-11}$ до $2{,}50\cdot10^{-10}$) от дозы препарата ^{14}C-Aza, включенного в ДНК КМ мыши, в диапазоне от 17 до 188 нКи/мышь. Предложено использовать данный метод для непосредственного измерения включения азацитидина в ДНК и РНК из МКПК и КМ пациентов для оптимизации дозирования и оценки взаимодействия с мишенью, при этом для анализа требуется всего ~5 мл цельной крови и ~3 мл костного мозга пациентов.

Таким образом, применение УМС является новым и весьма действенным подходом к сбору ключевой информации по фармакокинетике и метаболизму лекарственных средств на ранних стадиях их разработки. Можно получать основные фармакокинетические параметры клиренса, объем распределения и абсолютную биодоступность для исходного препарата и его метаболитов, не проводя длительные и дорогостоящие доклинические исследования на животных. Еще одним достоинством количественной оценки метаболизма препарата у человека является получение надежных данных о механизмах превращения и выведения чужеродного вещества, а также возможность синтеза метаболитов и их тестирования безопасности на самых ранних стадиях разработки.

3. Биомедицинские эксперименты на УНУ УМС ИЯФ СО РАН

Наши исследования с помощью УМС по биомедицинскому направлению начались с анализа динамики распределения ^{14}C после внутрибрюшинного введения меченого метанола лабораторным мышам. Кинетика выведения метанола и его метаболитов из различных органов мышей была получена путем УМС-анализа графитизированных образцов печени, почек и головного мозга мышей. После введения 20 мкл метанола с радиоактивностью 20 Бк концентрация радиоуглерода в печени оставалась стабильно высокой (400−500 мг/кг) на протяжении всего времени испытаний, тогда как в мозге это значение снижалось до 20 мг/кг в течение 24 часов. Кинетика выведения метанола и его метаболитов из почек была медленнее, чем в головном мозге: до уровня 100 мг/кг за 24 ч (рис. 2).

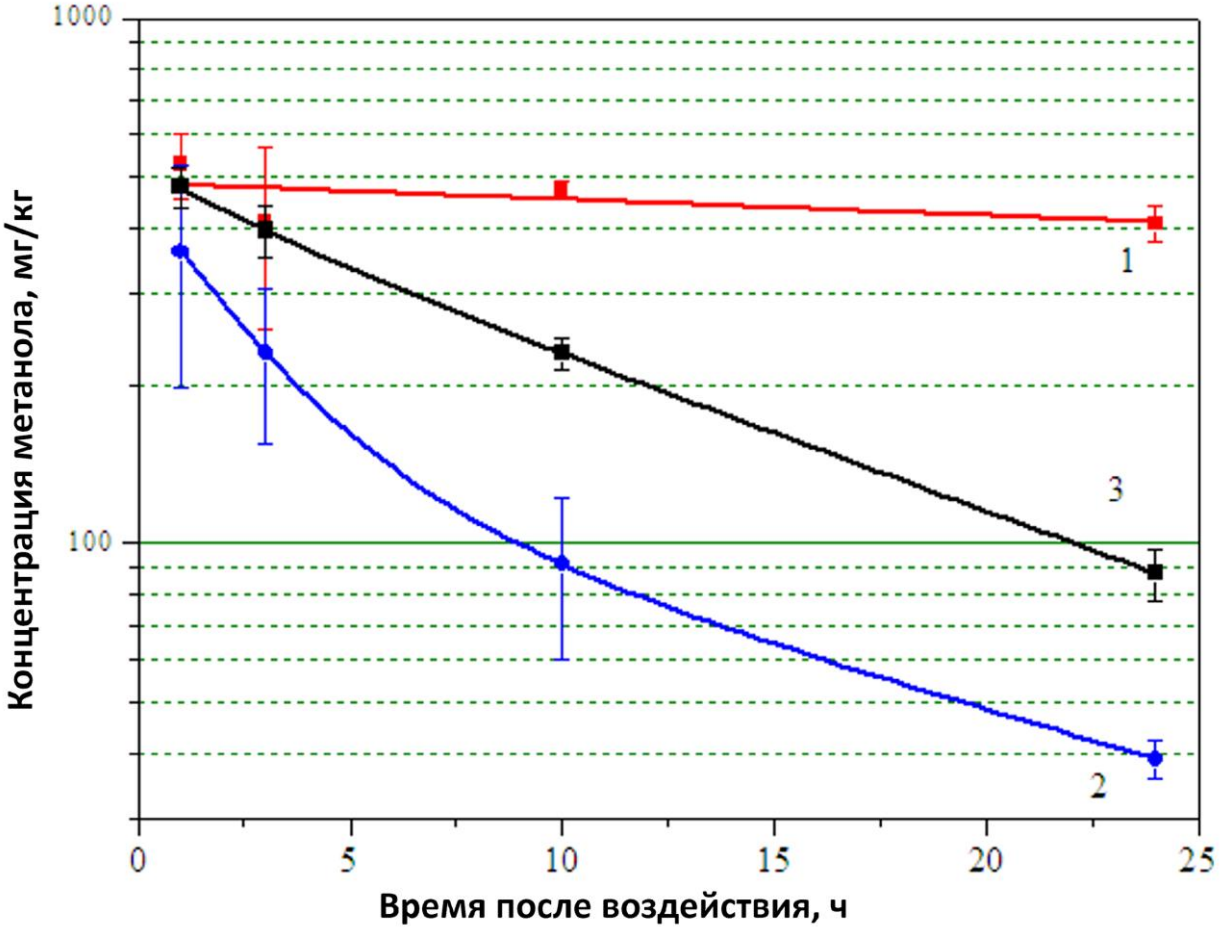


Рисунок 2. Изменение концентрации метанола и его метаболитов в печени (1), мозге (2) и почках (3) лабораторных мышей (самцы мышей линии CBA массой 23−25 г из инкубатория ФГБНУ НИИ фундаментальной и клинической иммунологии) после однократного внутрибрюшинного введения ^{14}C-метанола

В 2016 г. мы провели мультидисциплинарное исследование с привлечением сотрудников и ресурсов шести организаций Академгородка г. Новосибирска по воздействию аэрозольных частиц на живой организм и проникающей способности частиц органического происхождения разного размера при их низких концентрациях в воздухе [13, 14]. Вследствие малых размеров частиц (менее 10 мкм) и малого количества вдыхаемых (10^3–10^5 шт/см^3, <100 мкг/м^3) или вводимых (10^{-6}–10^{-8} г на 1 г органа) частиц прямые исследования инородных частиц в живых организмах методами хроматографии, электронной, флуоресцентной микроскопии, ЯМР и масс-спектрометрии крайне осложнены или невозможны из-за недостаточной чувствительности методов. Сложность прямого определения содержания органических частиц в организме вынуждает исследователей использовать слишком большие дозы вещества и/или вводить частицы в условиях, значительно отличающихся от наблюдаемых или применяемых в действительности, например, внутривенно или под повышенным давлением непосредственно в дыхательные пути. Очевидно, что результаты испытаний новых лекарственных препаратов и исследований воздействия аэрозолей в таких условиях могут значительно отличаться от результатов, наблюдаемых при практическом использовании лекарств и в реальных условиях воздействия аэрозолями.

С использованием УМС мы предложили прямое определение ультрамалого содержания инородных нано- и микрочастиц в биологических тканях, позволяющее проводить испытания новых лекарств и исследования воздействия аэрозолей на

живые организмы в естественных условиях. Для этого из меченого метанола был синтезирован меченый стирол, который подвергся полимеризации с получением меченых монодисперсных микросфер – полистирольных (ПС) частиц, которые, в свою очередь, послужили источником аэрозоли для воздействия на лабораторных мышей (рис. 3) [14]. Были проведены две серии экспериментов: в первой серии получены микросферы размером около 220 нм, во второй – около 80 нм, в обоих случаях с активностью 600 кБк/г, и в обеих сериях мыши подвергались аэрозольному воздействию в течение 5 дней по 30 мин. в день.

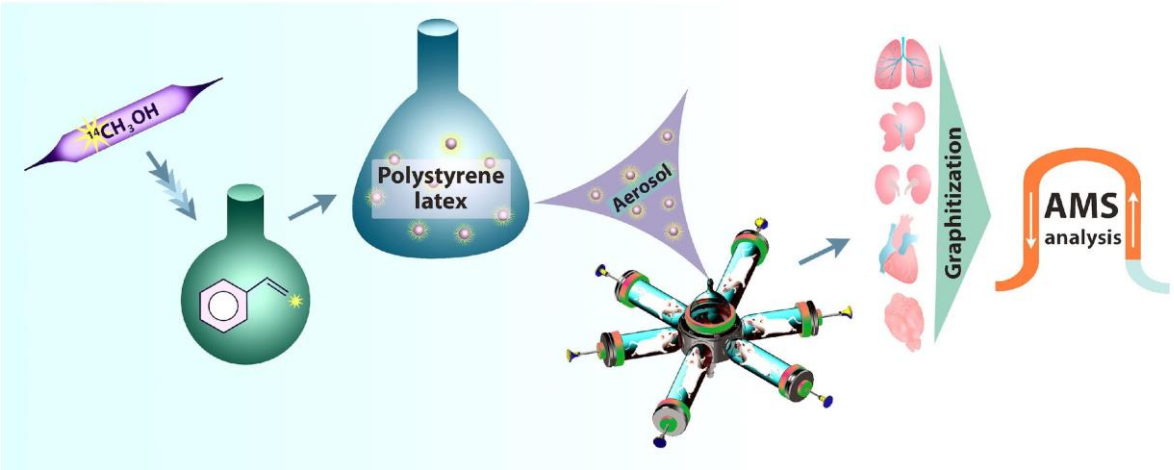


Рисунок 3. Схема проведенных экспериментов по изучению воздействия полистирольных микросфер на органы лабораторных мышей при их вдыхании в естественных условиях (авторы выражают благодарность К. А. Бабиной за создание рисунка)

Результаты УМС-анализа органов мышей в первой серии экспериментов показали повышенное относительное содержание радиоуглерода в легких и печени: 0,18±0,02 и 0,10±0,02 соответственно. Данное превышение означает, что в 1 г легких и печени находилось около 10^{-8} г ПС частиц, а суммарное количество меченых ПС частиц, введенных ингаляционным путем в экспериментальных мышей, составляло 10^7 шт. на 1 мышь. Во втором эксперименте оказалось, что через 6 месяцев после воздействия частицы обнаруживаются в легких, сердце, печени и мозге экспериментальных мышей. Суммарное количество введенных ингаляционным путем частиц в каждую мышь составило $6 \cdot 10^6$ шт.

Была предпринята попытка внедрения в медицинскую практику безвредного для человека способа обнаружения в организме бактерии Helicobacter pylori, вызывающей гастрит, язву желудка и другие подобные заболевания. Для анализа человеку дают выпить 5 мл раствора, полученного разведением медицинского препарата Уреакапс 14С[5] в 500 мл дистиллированной воды (100-кратно меньшая доза, чем принимаемая пациентами при радиометрической диагностике Helicobacter pylori). Уреакапс 14С, производимый ФГУП «НИФХИ им. Л. Я. Карпова», представляет собой капсулу с меченой мочевиной с активностью 37 кБк. Через 10 минут производится сбор углекислого газа из выдоха пациента, графитизация CO_2 и УМС-анализ полученного графита. Результаты проведенных экспериментов с участием 15 взрослых добровольцев, представленные на рис. 4, показывают достоверно различную активность бактерии в желудках разных людей – почти на два порядка, близость активности у супругов, имеющих значительный риск взаимного заражения, а также сходимость результатов, получаемых для одного человека, не высказывающего

[5] https://www.gosspravka.ru/lekarstva/ureakaps-14s.html

жалобы на работу ЖКТ. Стоит отметить, что низкая радиоактивность медицинского препарата и простота процедуры графитизации углекислого газа позволяют проводить описанную диагностику безопасно для человека до 300 раз в год. Для внедрения описанного способа в медицинскую практику требуется прохождение множества длительных процедур сертификации, разработка тест-систем и организация механизма доставки проб на УМС-анализ, что потребует определенных инвестиций. С другой стороны, сейчас предлагается ряд других, более простых способов диагностики *Helicobacter pylori* – от традиционного зондирования до аммиачного дыхательного теста, поэтому при текущем уровне медицинской диагностики такие инвестиции могут показаться нецелесообразными.

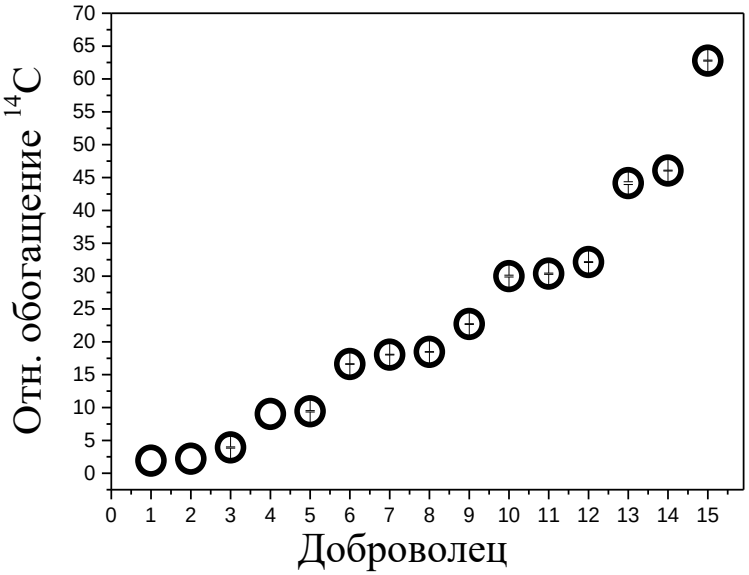


Рисунок 4. Результаты УМС-анализа превышения ^{14}C относительно фонового значения ($^{14}C_{образец}/^{14}C_{фон}$) в выдохе человека через 10 мин. после приема 5 мл 100-кратно разбавленного водой препарата Уреакапс 14С. Доброволец под номерами 2 и 4 – Е. В. Пархомчук в 2013 и 2015 гг. соответственно. Добровольцы 11, 13 и 12, 14 – две супружеские пары

К недавним работам относится разработка нового метода диагностики вирус-клеточного взаимодействия на примере вируса гриппа А с введенной меткой радиоуглерода 14С [15], подробно описанного Е. А. Прокопьевой в этом же номере журнала. Отличием данного метода диагностики является возможность проведения подсчета сверхнизкого количества вирионов в вируссодержащей жидкости, а также определение числа проникших вирусных частиц в любые ткани, инфицированные вирусами. Предложенный метод применим в исследованиях механизмов развития высоколетальной инфекции, а также в разработке онколитических вирусов.

4. Заключение

Уникальные возможности ускорительной масс-спектрометрии уже двадцать лет активно используются за рубежом в исследованиях биологической и медицинской направленности, в т. ч. при комбинировании метода с другими современными аналитическими подходами. К настоящему моменту накоплен большой массив данных о применении УМС в клинических испытаниях лекарств и других ксенобиотиков, на рынок поступают новые лекарства, разработанные с использованием УМС, и раковые больные получают персонализированную

медицинскую помощь. С момента запуска первого УМС в России спрос на УМС-исследования значительно возрос. В Новосибирске в ЦКП «УМС НГУ-ННЦ» в непрерывном режиме работают два ускорительных масс-спектрометра и две системы графитизации образцов, проводятся работы с меченными радиоуглеродом соединениями, поэтому есть возможность внедрения инновационной технологии в фармакологическую и медицинскую практику.

5. Благодарности

Авторы признательны М. А. Кулешовой за аккуратную работу с навесками образцов, С. А. Растигееву за участие в измерениях на УНУ УМС ИЯФ на ранних этапах, а также всем студентам и аспирантам, принимавшим участие в работах на УМС. Помимо госзаданий указанных в аффилиации организаций, дополнительное финансирование работ на УМС в 2014−2020 гг. осуществлялось по программе «ТОП-5-100» НГУ, в 2022 г. – по программе «Приоритеты-2030», работа М. А. Кулешовой и Д. В. Кулешова в 2022 г. осуществлялась по проекту № FSUS-2020-0036 (БЧ-2020-0036) госзадания НГУ.

6. Список литературы

1. Hans-Arno Synal. Developments in accelerator mass spectrometry // International Journal of Mass Spectrometry. 2013. Vol. 349–350. P. 192-202.
2. Walter Kutschera. Applications of accelerator mass spectrometry // International Journal of Mass Spectrometry. 2013. Vol. 349–350. P. 203–218
3. Назаров Е.И., Кружалов А.В., Екидин А.А., Васянович М.Е., Пархомчук В.В., Растигеев С.А., Калинкин П.Н., Пархомчук Е.В. Приборы и методы измерения 14С (обзор) // Приборы и техника эксперимента. 2021.№6. С.8-14.
4. Mehran Salehpour, Karl Håkansson, Göran Possnert. Accelerator mass spectrometry of ultra-small samples with applications in the biosciences // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2013. Vol. 294. P. 97-103.
5. LT Vuong, AB Blood, JS Vogel, ME Anderson, B Goldstein. Applications of accelerator MS in pediatric drug evaluation // Bioanalysis. 2012. Vol. 4, Iss. 15. P. 1871–1882.
6. Le Thuy Vuong, Qi Song, Hee Joo Lee, Ad F Roffel, Seok-Ho Shin, Young G Shin, Stephen R Dueker. Opportunities in low-level radiocarbon microtracing: applications and new technology // Future Sci. OA. 2016. Vol. 2, Iss. 1. FSO74.
7. Graham Lappin, Lloyd Stevens Biomedical accelerator mass spectrometry: recent applications in metabolism and pharmacokinetics // Expert Opinion on Drug Metabolism & Toxicology. 2008. Vol. 4, Iss. 8. P. 1021-2033.
8. Ali Arjomand. Accelerator mass spectrometry-enabled studies: current status and future prospects // Bioanalysis. 2010. Vol. 2, Iss. 3. P. 519–541.
9. Алиновский Н.И., Гончаров А.Д., Клюев В.Ф. Клюев В.Ф., Константинов С.Г., Константинов Е.С., Крючков А.М., Пархомчук В.В., Петриченков М.В., Растигеев С.А., Рева В.Б.. Ускорительный масс-спектрометр СО РАН // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, № 9. С. 107-111.
10. Lysikov A.I., Kalinkin P.N., Sashkina K.A., Okunev A.G., Parkhomchuk E.V., Rastigeev S.A., Parkhomchuk V.V., Kuleshov D.V., Vorobyeva E.E., Dralyuk R.I. Novel Simplified Absorption-Catalytic Method of Sample Preparation for AMS Analysis Designed at the Laboratory of Radiocarbon Methods of Analysis (LRMA) in Novosibirsk Akademgorodok // International Journal of Mass Spectrometry. 2018. V. 433. P. 11.
11. Wacker L., Nˇemec M., Bourquin J. A revolutionary graphitisation system: Fully automated, compact and simple // Nuclear Instruments and Methods in Physics

Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010. Vol. 268. P. 931–934.
12. Aleksandr Sabrekov, Anatoly Prokushkin, Yuriy Litti, Mikhail Glagolev, Ekaterina Parkhomchuk, Alexey Petrozhitskii, Peter Kalinkin, Dmitry Kuleshov, Irina Terentieva. Shallow aquifers as an element of methane biogeochemical cycle in West Siberia // Материалы конференции EGU General Assembly 2022, 23–27 May, Vienna, Austria.
13. Parkhomchuk E.V., Prokopyeva E.A., Gulevich D.G., Taratayko A.I., Baklanov A.M., Kalinkin P.N., Rastigeev S.A., Kuleshov D.V., Sashkina K.A., Parkhomchuk V.V. Ultrafine Organic Aerosol Particles Inhaled by Mice at Low Doses Remain in Lungs More than Half an Year // Journal of Labelled Compounds and Radiopharmaceuticals. 2019. V.62. NS11. P.785-793.
14. Parkhomchuk E.V., Gulevich D.G., Taratayko A.I., Baklanov A.M., Selivanova A.V., Trubitsyna T.A., Voronova I.V., Kalinkin P.N., Okunev A.G., Rastigeev S.A., Reznikov V.A., Semeykina V.S., Sashkina K.A., Parkhomchuk V.V. Ultrasensitive Detection of Inhaled Organic Aerosol Particles by Accelerator Mass Spectrometry // Chemosphere. 2016. V.159. P.80-88.
15. Прокопьева Е.А., Пархомчук Е.В., Соболев И.А., Шестопалов А.М. Разработка нового метода диагностики вирус-клеточного взаимодействия с помощью ускорительной масс-спектрометрии // Современные проблемы науки и образования. 2019. №1. С.12-.
16. Патенты РФ: RU2638820C1, опубликован 15 дек. 2017 г., Заявка 2016143497 от 3 нояб. 2016 г; RU2617364C1 , опубликован 24 апр. 2017 г., Заявка 2015148457 от 11 нояб. 2015 г.; RU2560066C1 , опубликован 20 авг. 2015 г., Заявка 2014121959/13 от 29 мая 2014 г; RU2574738C2 , опубликован 10 февр. 2016 г., Заявка 2014120119/13 от 19 мая 2014 г
17. Е.И. Назаров А.В. Кружалов М.Е. Васянович А.А. Екидин В.В Кукарских Е.В. Пархомчук А.В Петрожицкий В.В. Пархомчук. 14С в годичных кольцах деревьев в районе расположения объектов использования атомной энергии // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2022. №1. С. 107-117.
18. K.L. Spalding, Ratan D. Bhardwaj, Henrik Druid, Jonas Frisén. Retrospective birth dating of cells in humans // Cell. 2005. Vol. 122. P. 133–143.
19. Anhye Kim, Stephen R. Dueker, Jun Gi Hwang, Jangsoo Yoon, Sang-Won Lee, Hye Suk Lee, Byung-Yong Yu, Kyung-Sang Yu, Howard Lee. An Investigation of the Metabolism and Excretion of KD101 and Its Interindividual Differences: A Microtracing Mass Balance Study in Humans // Clinical and Translational Science. 2021. Vol. 14. P. 231–238.
20. Douglas K. Spracklin, Danny Chen, Arthur J. Bergman, Ernesto Callegari, R. Scott Obach. Mini-Review: Comprehensive Drug Disposition Knowledge Generated in the Modern Human Radiolabeled ADME Study // CPT: Pharmacometrics & Systems Pharmacology. 2020. Vol. 9. P. 428–434.
21. Shiyao Xu, Dan Tatosian, Ian Mcintosh, Maria Caceres, Catherine Matthews, Koppara Samuel, Diana Selverian, Sanjeev Kumar & Eunkyung Kauh. Absorption, Metabolism and Excretion of [14C]Omarigliptin, a Once-Weekly DPP-4 Inhibitor, in Humans // Xenobiotica. 2018. Vol. 48, Iss. 6. P. 584-591.
22. M.A Seymour. Accelerator MS: its role as a frontline bioanalytical technique // Bioanalysis. 2011. Vol. 3, Iss. 24. P. 2817–2823.
23. Muhammad Waqas Sadiq, Mehran Salehpour, Niklas Forsgard, Goran Possnert, Margareta Hammarlund-Udenaes. Morphine Brain Pharmacokinetics at Very Low Concentrations Studied with Accelerator Mass Spectrometry and Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry // Drug metabolism and disposition. 2011. Vol. 39. P. 174–179.

24. Michael A. Malfatti, Bruce A. Buchholz, Heather A. Enright, Benjamin J. Stewart,Ted J. Ognibene, A. Daniel McCartt, Gabriela G. Loots, Maike Zimmermann, Tiffany M. Scharadin, George D. Cimino, Brian A. Jonas, Chong-Xian Pan, Graham Bench, Paul T. Henderson, Kenneth W. Turteltaub. Radiocarbon Tracers in Toxicology and Medicine: Recent Advances in Technology and Science // Toxics. 2019. Vol. 7, Iss. 27. P.1-22.
25. R Colin Garner. Practical experience of using human microdosing with AMS analysis to obtain early human drug metabolism and PK data // Bioanalysis. 2010. Vol. 2, Iss. 3. P. 429–440.
26. G. Lappin, C. C. Wagner, O. Langer, N. van de Merbel. New ultrasensitive detection technologies and techniques for use in microdosing studies // Bioanalysis. 2009. Vol. 1, Iss. 2. P. 357–366.
27. Soo Kyung Bae, Ji-Hong Shon. Microdosing Studies Using Accelerated Mass Spectrometry as Exploratory Investigational New Drug Trials // Archives of Pharmacal Research. 2011. Vol. 34, No 11. P. 1789-1797.
28. Xiaomin Wang, Wouter H.J. Vaes, Esther van Duijn, Irene Nooijen, Zeen Tonga, Daniel Lopes de Menezes, Stephen E. Maxwell. Quantification of azacitidine incorporation into human DNA/RNA by accelerator mass spectrometry as direct measure of target engagement // Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. 2021. Vol. 202, Iss. 114152. P. 1-8.
29. Heather A. Enright, Michael A. Malfatti, Maike Zimmermann, Ted Ognibene, Paul Henderson, Kenneth W. Turteltaub. Use of Accelerator Mass Spectrometry in Human Health and Molecular Toxicology // Chemical Research in Toxicology. 2016. Vol. 29, Is. 12. P. 1976–1986.
30. Iyer GR, Patel Y, Teuscher NS. A novel study using accelerated mass spectrometry to evaluate the pharmacokinetics of total 14C AL-8309 (Tandospirone) following topical ocular administration in healthy male subjects // Clinical Pharmacology in Drug Development. 2012. Vol. 1, Iss.1. P. 4–13.
31. Bruce A. Buchholz et al. HPLC-Accelerator MS Measurement of Atrazine Metabolites in Human Urine after Dermal Exposure // Analytical Chemistry. 1999. Vol. 71. P. 3519-3525.
32. EMEA, Position Paper on Non-clinical Safety Studies to Support Clinical Trials with a Single Microdose. Position paper CPMP/SWP/2599, 23 June 2004.
33. Food and Drug Administration US Department of Health and Human Services Guidance for Industry Investigators and Reviewers. Exploratory IND Studies. January 2006.

Сведения об авторах:

Пархомчук Екатерина Васильевна, Новосибирский государственный университет, кандидат химических наук, директор ЦКП «УМС НГУ-ННЦ», 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, ekaterina@catalysis.ru

Петрожицкий Алексей Валентинович, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, научный сотрудник, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11.

Игнатов Михаил Михайлович, Институт археологии и этнографии СО РАН, ведущий инженер, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 17.

Кулешов Дмитрий Викторович, Новосибирский государственный университет, ЦКП «УМС НГУ-ННЦ», инженер, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

Калинкин Петр Николаевич, Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, научный сотрудник, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 5.

Прокопьева Елена Александровна, Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, 630017, г. Новосибирск, ул. Тимакова, 2.

Кутнякова Любовь Александровна, Институт археологии и этнографии СО РАН, младший научный сотрудник, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 17.

Пархомчук Василий Васильевич, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, доктор физико-математических наук, академик РАН, 630090, г.Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11.

ACCELERATOR MASS SPECTROMETRY FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS (SHORT REVIEW)

E. V. Parkhomchuk[1,3,4], A. V. Petrozhitskii[1,2,3], M. M. Ignatov[1,3], D. V. Kuleshov[1,3], P. N. Kalinkin[4], E. A. Prokopyeva [1,2], L. A. Kutnyakova[3], V. V. Parkhomchuk[1,2]

[1] Novosibirsk State University, AMS Golden Valley, Novosibirsk, Russian Federation, 630090

[2]Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation, 630090

[3] Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation, 630090

[4] Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation, 630090

[5] Federal Research Center for Fundamental and Translational Medicine, Novosibirsk, Russia

Biomedical applications of the ^{14}C accelerator mass spectrometry method are presented: mass balance determination and ADME/AME studies; drug metabolites or xenobiotics profiling in combination with the HPLC method; xenobiotics or drugs pharmacokinetics study in the early stages of development using the microdose method; cytotoxicity level determination of substances. Examples of biomedical experiments at the Unique Scientific Facility AMS BINP SB RAS are given: ^{14}C-labeled methanol and its metabolites excretion kinetics study from mice various organs; study of the aerosol particles impact on a living organism, in case of various sizes polystyrene ^{14}C labeled microspheres at low concentrations; method of detecting Helicobacter pylori using ^{14}C labeled urea is tested; a method for recording ultra-low concentrations of viruses is proposed.

The capabilities of radiocarbon AMS detection are one ^{14}C atom per 10^{12}-10^{15} ^{12}C atoms. This high sensitivity makes it possible to shift the detection threshold of ^{14}C labeled substances of interest to lower concentrations, inaccessible to the state of art methods used previously. Therefore, the possibility to use of drugs in subpharmacological doses opens up. On the one hand, such small doses can be considered to be safe for human health, and on the other hand, they give an early overview of the human body reaction to substances of interest. At the same time, the labeled drugs radioactivity, required for accurate AMS registration, is several times lower than the natural radiation level. Thus, it does not pose a threat to the human health. The use of radiocarbon AMS in biomedicine reduces drug development time.

Keywords: accelerator mass spectrometry, radiocarbon, biomedicine, ADME/AME studies, metabolite profiling, microdosing, cytotoxicity

References

1. Hans-Arno Synal. Developments in accelerator mass spectrometry // International Journal of Mass Spectrometry. 2013. Vol. 349–350. P. 192-202.
2. Walter Kutschera. Applications of accelerator mass spectrometry // International Journal of Mass Spectrometry. 2013. Vol. 349–350. P. 203–218.
3. Nazarov E.I., Kruzhalov A.V., Ekidin A.A., Vasyanovich M.E., Parkhomchuk V.V., Rastigeev S.A., Kalinkin P.N., Parkhomchuk E.V. Instruments and Methods for Measuring 14C (a Review) // Instruments and Experimental Techniques. 2021. V.64. N6. P.790–795.
4. Mehran Salehpour, Karl Håkansson, Göran Possnert. Accelerator mass spectrometry of ultra-small samples with applications in the biosciences // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2013. Vol. 294. P. 97-103.
5. LT Vuong, AB Blood, JS Vogel, ME Anderson, B Goldstein. Applications of accelerator MS in pediatric drug evaluation // Bioanalysis. 2012. Vol. 4, Iss. 15. P. 1871–1882.
6. Le Thuy Vuong, Qi Song, Hee Joo Lee, Ad F Roffel, Seok-Ho Shin, Young G Shin, Stephen R Dueker. Opportunities in low-level radiocarbon microtracing: applications and new technology // Future Sci. OA. 2016. Vol. 2, Iss. 1. FSO74.
7. Graham Lappin † & Lloyd Stevens Biomedical accelerator mass spectrometry: recent applications in metabolism and pharmacokinetics // Expert Opinion on Drug Metabolism & Toxicology. 2008. Vol. 4, Iss. 8. P. 1021-2033.
8. Ali Arjomand. Accelerator mass spectrometry-enabled studies: current status and future prospects // Bioanalysis. 2010. Vol. 2, Iss. 3. P. 519–541.
9. Alinovsky N.I., Goncharov A.D., Klyuev V.F. Klyuev V.F., Konstantinov S.G., Konstantinov E.S., Kryuchkov A.M., Parkhomchuk V.V., Petrichenkov M.V., Rastigeev S.A., Reva V.B. Accelerator mass-spectrometer SB RAS // Journal of technical physics. 2009. V. 79, No. 9. S. 107-111.
10. Lysikov A.I., Kalinkin P.N., Sashkina K.A., Okunev A.G., Parkhomchuk E.V., Rastigeev S.A., Parkhomchuk V.V., Kuleshov D.V., Vorobyeva E.E., Dralyuk R.I. Novel Simplified Absorption-Catalytic Method of Sample Preparation for AMS Analysis Designed at the Laboratory of Radiocarbon Methods of Analysis (LRMA) in Novosibirsk Akademgorodok // International Journal of Mass Spectrometry. 2018. V. 433. P. 11.
11. Wacker L., Nˇemec M., Bourquin J. A revolutionary graphitisation system: Fully automated, compact and simple // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010. Vol. 268. P. 931–934.
12. Aleksandr Sabrekov, Anatoly Prokushkin, Yuriy Litti, Mikhail Glagolev, Ekaterina Parkhomchuk, Alexey Petrozhitskii, Peter Kalinkin, Dmitry Kuleshov, Irina Terentieva. Shallow aquifers as an element of methane biogeochemical cycle in West Siberia // Материалы конференции EGU General Assembly 2022, 23–27 May, Vienna, Austria.
13. Parkhomchuk E.V., Prokopyeva E.A., Gulevich D.G., Taratayko A.I., Baklanov A.M., Kalinkin P.N., Rastigeev S.A., Kuleshov D.V., Sashkina K.A., Parkhomchuk V.V. Ultrafine Organic Aerosol Particles Inhaled by Mice at Low Doses Remain in Lungs More than Half an Year // Journal of Labelled Compounds and Radiopharmaceuticals. 2019. V.62. NS11. P.785-793.
14. Parkhomchuk E.V., Gulevich D.G., Taratayko A.I., Baklanov A.M., Selivanova A.V., Trubitsyna T.A., Voronova I.V., Kalinkin P.N., Okunev A.G., Rastigeev S.A., Reznikov V.A., Semeykina V.S., Sashkina K.A., Parkhomchuk V.V. Ultrasensitive Detection of Inhaled Organic Aerosol Particles by Accelerator Mass Spectrometry // Chemosphere. 2016. V.159. P.80-88.
15. Prokop’eva E.A., Parkhomchuk E.V., Sobolev I.A., Shestopalov A.M. Development of a

new method for diagnosing virus-cell interaction using accelerator mass spectrometry // Modern problems of science and education. 2019. No. 1. pp.12-15.
16. Patent RU: RU2638820C1, 15/12/2017; RU2617364C1, 24/04/2017 г.; RU2560066C1, 20/08/2015 г.; RU2574738C2, 10/02/2016 г..
17. Nazarov E.I. Kruzhalov A.V. Vasyanovich M.E. Ekidin A.A. Kukarskikh V.V. Parkhomchuk E.V. Petrozhitsky A.V. Parkhomchuk V.V.. 14C in Tree Rings in the Vicinity of the Nuclear Facility Deployment Areas// Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika. 2022. №1. С. 107-117.
18. K.L. Spalding, Ratan D. Bhardwaj, Henrik Druid, Jonas Frisén. Retrospective birth dating of cells in humans // Cell. 2005. Vol. 122. P. 133–143.
19. Anhye Kim, Stephen R. Dueker, Jun Gi Hwang, Jangsoo Yoon, Sang-Won Lee, Hye Suk Lee, Byung-Yong Yu, Kyung-Sang Yu, Howard Lee. An Investigation of the Metabolism and Excretion of KD101 and Its Interindividual Differences: A Microtracing Mass Balance Study in Humans // Clinical and Translational Science. 2021. Vol. 14. P. 231–238.
20. Douglas K. Spracklin, Danny Chen, Arthur J. Bergman, Ernesto Callegari, R. Scott Obach. Mini-Review: Comprehensive Drug Disposition Knowledge Generated in the Modern Human Radiolabeled ADME Study // CPT: Pharmacometrics & Systems Pharmacology. 2020. Vol. 9. P. 428–434.
21. Shiyao Xu, Dan Tatosian, Ian Mcintosh, Maria Caceres, Catherine Matthews, Koppara Samuel, Diana Selverian, Sanjeev Kumar & Eunkyung Kauh. Absorption, Metabolism and Excretion of [14C]Omarigliptin, a Once-Weekly DPP-4 Inhibitor, in Humans // Xenobiotica. 2018. Vol. 48, Iss. 6. P. 584-591.
22. M.A Seymour. Accelerator MS: its role as a frontline bioanalytical technique // Bioanalysis. 2011. Vol. 3, Iss. 24. P. 2817–2823.
23. Muhammad Waqas Sadiq, Mehran Salehpour, Niklas Forsgard, Goran Possnert, Margareta Hammarlund-Udenaes. Morphine Brain Pharmacokinetics at Very Low Concentrations Studied with Accelerator Mass Spectrometry and Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry // Drug metabolism and disposition. 2011. Vol. 39. P. 174–179.
24. Michael A. Malfatti, Bruce A. Buchholz, Heather A. Enright, Benjamin J. Stewart,Ted J. Ognibene, A. Daniel McCartt, Gabriela G. Loots, Maike Zimmermann, Tiffany M. Scharadin, George D. Cimino, Brian A. Jonas, Chong-Xian Pan, Graham Bench, Paul T. Henderson, Kenneth W. Turteltaub. Radiocarbon Tracers in Toxicology and Medicine: Recent Advances in Technology and Science // Toxics. 2019. Vol. 7, Iss. 27. P.1-22.
25. R Colin Garner. Practical experience of using human microdosing with AMS analysis to obtain early human drug metabolism and PK data // Bioanalysis. 2010. Vol. 2, Iss. 3. P. 429–440.
26. G. Lappin, C. C. Wagner, O. Langer, N. van de Merbel. New ultrasensitive detection technologies and techniques for use in microdosing studies // Bioanalysis. 2009. Vol. 1, Iss. 2. P. 357–366.
27. Soo Kyung Bae, Ji-Hong Shon. Microdosing Studies Using Accelerated Mass Spectrometry as Exploratory Investigational New Drug Trials // Archives of Pharmacal Research. 2011. Vol. 34, No 11. P. 1789-1797.
28. Xiaomin Wang, Wouter H.J. Vaes, Esther van Duijn, Irene Nooijen, Zeen Tonga, Daniel Lopes de Menezes, Stephen E. Maxwell. Quantification of azacitidine incorporation into human DNA/RNA by accelerator mass spectrometry as direct measure of target engagement // Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. 2021. Vol. 202, Iss. 114152. P. 1-8.
29. Heather A. Enright, Michael A. Malfatti, Maike Zimmermann, Ted Ognibene, Paul Henderson, Kenneth W. Turteltaub. Use of Accelerator Mass Spectrometry in Human

Health and Molecular Toxicology // Chemical Research in Toxicology. 2016. Vol. 29, Is. 12. P. 1976–1986.
30. Iyer GR, Patel Y, Teuscher NS. A novel study using accelerated mass spectrometry to evaluate the pharmacokinetics of total 14C AL-8309 (Tandospirone) following topical ocular administration in healthy male subjects // Clinical Pharmacology in Drug Development. 2012. Vol. 1, Iss.1. P. 4–13.
31. Bruce A. Buchholz et al. HPLC-Accelerator MS Measurement of Atrazine Metabolites in Human Urine after Dermal Exposure // Analytical Chemistry. 1999. Vol. 71. P. 3519-3525.
32. EMEA, Position Paper on Non-clinical Safety Studies to Support Clinical Trials with a Single Microdose. Position paper CPMP/SWP/2599, 23 June 2004.
33. Food and Drug Administration US Department of Health and Human Services Guidance for Industry Investigators and Reviewers. Exploratory IND Studies. January 2006.

УДК 001.892:621.039.6

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРИНИТИ В РАМКАХ ФЕДЕРАЛЬНОГО ПРОЕКТА «РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА И ИННОВАЦИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

Д.В. Марков, К.И. Ильин

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «ТРИНИТИ», г. Троицк, Россия

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» является одной из базовых площадок реализации мероприятий проекта по «Разработке технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий». В настоящей статье кратко описаны направления исследований, реализуемых в проекте на площадке Института.

Ключевые слова: термоядерные исследования, управляемый термоядерный синтез.

1. Введение

Правительство РФ в конце 2020 г. утвердило комплексную программу «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в РФ на период до 2024 года» (далее – Программа). Программа объединяет в себе наиболее важные реализуемые либо планируемые к реализации мероприятия в области научных исследований и разработки ядерных, термоядерных и смежных технологий, создания новой техники, строительства инновационных энергоблоков АЭС большой и малой мощности, выполняемые предприятиями и организациями атомной отрасли в тесной кооперации с другими ведущими российскими научными и образовательными организациями и промышленными предприятиями. Программа состоит из пяти федеральных проектов.

Федеральный проект «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» (далее – Проект) – это единственная за последние 30 лет целостная программа развития по управляемому термоядерному синтезу. Реализация федерального проекта позволит сделать существенный шаг к решению проблемы освоения и использования термоядерной энергии – самой амбициозной задачи, поставленной человечеством в XX в.. Компоновка мероприятий федерального проекта обеспечивает сбалансированное продвижение к термоядерной энергетике вне зависимости от возможного изменения лидерства конкурирующих технологий по мере развития мировых термоядерных исследований.

Настоящий Проект включает набор мероприятий, обеспечивающих к 2024 г. основу развития научно-исследовательской инфраструктуры, выполнения научных исследований и разработок, совершенствования системы информационного обмена в Российской Федерации в области управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» (далее – Институт) является одной из базовых площадок реализации мероприятий Проекта. В настоящей статье кратко описаны направления исследований, реализуемых в рамках третьего федерального проекта Программы на площадке Института.

2. Постановка задачи

Очевидная привлекательность использования энергии реакций синтеза легких ядер для энергетики объясняет, почему, несмотря на многолетние, весьма дорогостоящие усилия ученых и инженеров, до сих пор не приведшие к устойчиво работающему реактору, ведущие страны мира продолжают финансировать термоядерные исследования. К основным достоинствам управляемого термоядерного синтеза (далее – УТС) следует отнести:

практически неограниченные топливные ресурсы, а также возможность наработки топлива для действующих АЭС;

- отсутствие, как и для атомных электростанций, выбросов в атмосферу окислов углерода и азота;
- в термоядерном реакторе не может иметь место неконтролируемый рост мощности;
- низкое остаточное энерговыделение в материалах реактора после его остановки позволяет обеспечить целостность конструкции в случае прекращения активного охлаждения;
- в термоядерном реакторе не образуются и, соответственно, не участвуют в топливном цикле делящиеся материалы и актиниды;
- в отработавших материалах отсутствуют продукты деления;
- радиоактивность материалов термоядерного реактора достаточно низка, что сводит к минимуму необходимость принятия дополнительных мер по изоляции части материалов непосредственно на площадке реактора;
- даже при маловероятных запроектных авариях на термоядерной электростанции не потребуется эвакуация населения из прилегающих районов, т. к. такая авария в самом пессимистическом сценарии приведет лишь к выходу из строя самой термоядерной установки, а не к радиоактивному заражению местности.

Стабильное развитие отдельных стран и регионов требует обеспечения достаточным количеством производимой энергии по доступной стоимости. Развитие различных регионов идёт разными темпами, и требования к источникам энергии и инфраструктуре энергетики будут отличаться. В этих условиях производство термоядерной энергии может быть реализовано в то время, когда перспективы использования других источников энергии в конкретной стране или в мире в целом могут существенно ухудшиться.

Сегодня все смотрящие вперед державы считают необходимым участие в термоядерных исследованиях, которые ведутся на самом передовом рубеже мировой науки и технологий.

Начало широкомасштабных работ по данной тематике в ходе реализации Программы позволит получить и внедрить в России передовые наукоемкие технологии, сохранить и развить существующие научные школы и систему подготовки кадров для будущей термоядерной энергетики. Условно весь Проект можно разделить на пять направлений исследований (рис. 1).

Рисунок 1. Структура Проекта.

2.1 Исследования и разработки по базовым термоядерным технологиям

Технологии магнитного удержания высокотемпературной термоядерной плазмы в установках ТОКАМАК называются базовыми термоядерными технологиями. В рамках данного направления в Институте разрабатывают, создают и исследуют на действующем токамаке Т-11М технологии циркуляции жидкого лития в вакуумной камере установки токамак и технологии ввода и вывода лития из токамака без его разгерметизации в целях обеспечения длительного режима непрерывной работы до 1000 с и достижение рабочего эксплуатационного ресурса литиевой защиты до 1000 ч. Совместно с партнерами НИЦ «Курчатовский институт» и АО «Красная звезда» ведется разработка концепции использования литиевой технологии защиты для токамака Т-15МД и в перспективе для токамака с реакторными технологиями (далее – ТРТ).

В 2021 г. в ходе совместных работ специалистам Института и АО «Красная звезда» впервые удалось осуществить внешнюю дозаправку эмиттерной системы токамака Т-11М литием без нарушения вакуумных условий в его рабочей камере.

Созданная в рамках данного направления работ инновационная технология литиевой защиты первой стенки реактора и дивертора позволит сделать качественный шаг для достижения реакторных режимов работы ТОКАМАКа.

Также в целях развития базовых термоядерных технологий будут проведены работы по реконструкции комплекса токамака с сильным полем на площадке Института, в т. ч. его инженерно-технических систем: энергетической, вакуумной, криогенной и др. Данные работы позволят обеспечить размещение на базе комплекса прототипа ТРТ до 2030 г.

Реализация этого раздела федерального проекта выведет Россию в число мировых лидеров в области базовых термоядерных технологий.

2.2 Исследования и разработки по гибридным реакторным технологиям и системам

В России разработки и исследования в области УТС развиваются в направлениях освоения энергии как «чистого» термоядерного синтеза, так и в сфере создания гибридных систем. Концепцию гибридного реактора следует рассматривать в увязке с ключевыми проблемами атомной энергетики по обеспечению ее устойчивого развития и замыкания топливного цикла. Главное преимущество гибридного термоядерного реактора по сравнению с любой другой ядерной установкой, обеспечивающей конверсию сырьевых изотопов в делящиеся, заключается в использовании термоядерных нейтронов высокой энергии, что позволяет почти в десять раз увеличить интенсивность наработки новых делящихся изотопов из сырьевых при одинаковой мощности установок. Это важнейшее качество приводит к тому, что присутствие гибридных термоядерных реакторов в структуре ядерной энергетической системы можно ограничить небольшой долей (менее 15 %) и при этом в полном объеме решить проблему обеспечения топливом. Реакторы деления, составляющие основу существующей атомной энергетики, будут обеспечены делящимися изотопами, произведенными в гибридных реакторах. Одновременно с этим гибридные реакторы будут обеспечены тритием, наработанным в реакторах деления. Вторая возможная задача гибридных реакторов – высокоэффективное дожигание минорных (младших) актинидов, накапливающихся в результате работы ядерных реакторов.

Выполнение мероприятий в рамках направления «Исследования и разработки по гибридным реакторным технологиям и системам» федерального проекта откроет путь к последующему созданию первой в мире гибридной реакторной установки – прообразу гибридного реактора для ускорения промышленного внедрения термоядерных технологий в действующую систему атомной энергетики. Задачей такого реактора видится использование термоядерных нейтронов для эффективной наработки топлива для атомных станций и переработки ОЯТ.

В Институте совместно с партнерами в рамках данного направления исследований ведутся работы по обоснованию и созданию тритиевого комплекса на базе модифицированного комплекса токамак с сильным полем. В 2021 г. была разработана эскизная конструкторская документация и экспериментально обоснованы технические решения составных частей тритиевого комплекса, которые обеспечивают:

- стыковку с системой хранения трития;
- очистку трития от примесей до объемных концентраций гелия ≤ 1 %, кислорода, азота и углерода ≤ 10-2 %;
- концентрацию примеси в отработанной плазме может быть на уровне 9 %, причем 3 % из них приходится на водородосодержащие вещества;
- максимальную величину газового потока из плазменной камеры составит 5 моль/ч;
- максимальную концентрацию трития в газовом потоке из плазменной камеры составит несколько десятков ppm (по объему);

- дозирование кондиционного трития в систему ВТК;
- измерение и контроль давления газа в системе в диапазоне 10-5–105 Па;
- измерение и контроль обогреваемого оборудования;
- проведение дейтерирования и дезактивации оборудования;
- учет и контроль трития.

В рамках межведомственной кооперации будет создан уникальный комплекс экспериментальных стендов для отработки гибридных технологий.

2.3 Лазерный термоядерный синтез и технологии

Несколько особняком стоят работы по инерционному (лазерному) термоядерному синтезу, принцип которого состоит в поджиге (микровзрыве) термоядерной мишени за время, меньшее времени ее разлета. Инерционный (лазерный) термоядерный синтез, разрабатываемый как альтернатива методу магнитного удержания, обеспечивает решение ряда специальных задач и продвижение в области фундаментальной науки – изучения пространственно-временной структуры материи и неизвестных явлений на стыке физики высоких энергий и физики сверхсильных полей.

В рамках направления «Лазерный термоядерный синтез и технологии» федерального проекта будут разработаны, изготовлены и испытаны все основные элементы создаваемого уникального лазерного комплекса, включая модули с мощностью 15 петаватт каждый и инженерную инфраструктуру лазерного комплекса.

Лазерная установка для экспериментов по управляемому термоядерному синтезу с инерциальным удержанием плазмы создается в Сарове. ТРИНИТИ – партнер ядерного центра в проекте. В настоящий момент работы ведутся на исследовательском стенде для изучения физических процессов и явлений, возникающих при диодной накачке и активном газовом криогенном охлаждении. На данной экспериментальной стендовой базе проводятся моделирование и испытание лазерных схем и отрабатываются субсистемы установки криогенного охлаждения, удаленной диодной накачки и др. Итогом работ будет разработка, создание и исследование экспериментального образца усилительного модуля с диодной накачкой с частотой повторения импульсов 10 Гц для отработки физических принципов, концепций и конструкторских решений создания модуля лазерной установки килоджоульного класса и на их основе разработка концепции создания канала лазерной системы с энергией в импульсе 10 кДж.

2.4 Разработка инновационных плазменных технологий, в т. ч. опытно-промышленных

Большое внимание в Проекте уделено развитию плазменных технологий. Выполнение мероприятий по направлению «Разработка инновационных плазменных технологий, в том числе опытно-промышленных» позволит продемонстрировать продуктивность термоядерной науки путем разработки устройств и технологий, пригодных для освоения промышленностью на современном этапе. Будут разработаны образцы промышленных установок по нанесению технологических покрытий различного назначения, технологии создания компонент радиационно стойкой электронной элементной базы на основе монокристаллических алмазов, полностью отечественные высокотемпературные сверхпроводники и др. Будет сделан качественный скачок в разработке и создании мощных плазменных ракетных двигателей нового поколения со значениями параметров, в 5–10 раз превышающими значения параметров существующих электрореактивных двигателей.

Институт традиционно занимается разработкой плазменных технологий различного применения, поэтому в рамках данного направления исследований имеет большой круг задач. Так будет разработан прототип плазменного ракетного двигателя на основе плазменного ускорителя с мощностью не ниже 300 кВт, удельным импульсом не менее 100 км/с. Такие устройства необходимы как для осуществления дальних перелетов, так и для сохранения паритета в космосе в околоземном пространстве. В 2021 г. учеными Института были определены габариты и достигнут параметр удельного импульса разрабатываемого двигателя. В 2022–2023 гг. будет подтвержден ресурс электродов ключевого элемента двигателя и КПД электрореактивного двигателя на основе плазменного ускорителя.

На площадке Института ведется создание установки источника нейтронов на базе столкновения плазменных сгустков, которая будет применяться для:

- проведения материаловедческих исследований в области термоядерной энергетики;
- использования в качестве источника нейтронов для гибридных систем, ядерной медицины и т. п.

Целью работы до 2024 г. является создание импульсного источника нейтронов синтеза с выходом 10^{14} Д-Д (в пересчете 10^{16} Д-Т) нейтронов за импульс на базе столкновения высокоскоростных плазменных сгустков, генерируемых импульсными ускорителями плазменных тороидов.

Следующее направление работ в рамках создания инновационных плазменных технологий – разработка технологии комплексного воздействия на материалы мощными импульсными потоками высокотемпературной плазмы и лазерного излучения. Новизна работы заключается в совместном использовании технологии лазерного наклепа и обработки импульсными плазменными потоками. Обработка поверхности изделия импульсными плазменными потоками позволяет в одном процессе совместить быструю закалку, легирование ионами плазмообразующего газа и облагораживание поверхности. Такая обработка позволяет существенно увеличить коррозионную стойкость и износостойкость, снизить коэффициент трения и налипание на поверхность. Обработка импульсным лазерным излучением (лазерный наклеп) также позволяет увеличить коррозионную стойкость и значительно повысить сопротивление усталости, не изменяя при этом качество обработки поверхности. Совместное использование воздействия импульсными плазменными потоками и метода лазерного наклепа открывает дополнительные возможности в упрочении материалов. В частности, одним из основных факторов, ограничивающих применение импульсных плазменных потоков, является формирование в результате обработки в поверхностном слое материала «растягивающих» напряжений (имеет место при формировании модифицированных слоев в несколько десятков и сотен микрон). Лазерное ударное упрочнение позволяет снизить величину напряжений, убрать их или изменить знак напряжений. Ожидается, что использование импульсных плазменных потоков совместно с лазерным упрочнением позволит реализовать схему управления величиной и знаком напряжений в поверхностном слое материала и существенно расширить возможности каждого из методов.

Объектами исследования являются конструкционные и функциональные материалы, применяемые для изготовления ответственных элементов различных машин и аппаратов, работающих в экстремальных условиях эксплуатации по температуре, агрессивности среды, циклическому механическому воздействию. В таких условиях кратковременно (менее 10 000 ч) работают лопатки турбореактивных двигателей, в т. ч. лопатки перспективных двигателей, работающих на принципах сжигания водород-кислородной смеси. В течение длительного времени (более 10 000 ч) в данных условиях работают резьбовые соединения бурильных замков,

дейдвудные подшипники гребных валов ледоколов, металлические имплантаты суставов.

В ходе выполнения работы будут проведены исследования возможности по улучшению комплекса свойств (износостойкости, коррозионной стойкости и усталостной прочности) для выбранных материалов.

Все работы данного направления имеют своей целью получение образца новой техники мирового уровня.

2.5 Разработка нормативной базы термоядерных и гибридных систем, обеспечение лицензионной деятельности, обмен научно-технической информацией

Наконец, в рамках мероприятий по направлению «Разработка нормативной базы термоядерных и гибридных систем, обеспечение лицензионной деятельности, обмен научно-технической информацией» впервые в мире при взаимодействии с МАГАТЭ на основе проведенных НИР будет создана основа нормативной базы, регламентирующей полный жизненный цикл термоядерных и гибридных систем, работающих в нейтронных режимах. Исследованы основные факторы опасности термоядерных и гибридных систем и определены пределы и условия их безопасной эксплуатации. Разработаны методы и средства анализа и оценки ключевых факторов опасности. Также будет разработана и внедрена система информационного и проектного обмена, охватывающая все организации участников Проекта, и система удаленного доступа к базам данных отечественного термоядерного эксперимента. В рамках данного направления исследований на площадке Института будут проведены работы по комплексному анализу возможных факторов опасности, присущих перспективным установкам, для разработки и обоснования необходимости внесения изменений в нормативные правовые акты, а также в ряд федеральных норм и правил в области использования атомной энергии с учетом специфики термоядерных и плазменных установок для успешной реализации подобных технологий.

3. Заключение

В заключение следует отметить, что фактически набор задач, которые предлагается решить в рамках Проекта, связан с формированием нового технологического уклада экспериментально-стендовой базы термоядерных исследований и технологий и говорит о масштабности вызовов, которые надо купировать. Прежде всего это относится к воссозданию широкого спектра наукоемких технологий точного машино- и приборостроения, отечественного материаловедения и электротехники, развитию элементной базы информационно-технологического сектора, разработке большого объема отечественного управляющего программного обеспечения. Плазменные технологии, разработанные в процессе термоядерных исследований, дадут толчок развитию фундаментальной науки и многочисленных новых приложений в различных отраслях науки и техники, включая атомную энергетику и космические исследования.

Тем самым реализация Институтом намеченных планов становится серьезным стимулом к развитию различных секторов экономики, восстановлению высококвалифицированных кадров для производственного, технологического и научно-исследовательского секторов экономики и должна рассматриваться как приоритетное направление исследований и разработок в России.

Сведения об авторах:

Марков Дмитрий Владимирович, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», доктор технических наук, генеральный директор, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушковых, вл. 12.

Кирилл Игоревич Ильин, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», кандидат технических наук, заместитель генерального директора, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушковых, вл. 12, ilyin@triniti.ru.

DIRECTIONS OF RESEARCH WITHIN THE FRAMEWORK OF THE FEDERAL PROJECT "DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR CONTROLLED FUSION AND INNOVATIVE PLASMA TECHNOLOGIES" IN TRINITI JSC

D. V. Markov, K. I. Ilyin

Joint Stock Company State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Troitsk, Russia

The Joint Stock Company State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research is one of the basic platforms for the implementation of the project activities on "Development of thermonuclear fusion control technologies and innovative plasma technologies". This article presents the main areas of research implemented in the project at the site of the Institute.

Key words: thermonuclear research, controlled thermonuclear fusion

УДК 504.3.054, 621.039.587

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ПОСТУПЛЕНИЯ ТРИТИЯ В АТМОСФЕРУ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВОДЫ В БРЫЗГАЛЬНЫХ БАССЕЙНАХ РОСТОВСКОЙ АЭС

А. А. Екидин [1], К. Л. Антонов [1], М. Е. Васянович [1], М. Д. Пышкина [1], А. Ф. Меркулов [2], П. А. Фоменко [2]

[1] ФГБУН Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия

[2] Филиал ОАО “Концерн Росэнергоатом” Ростовская атомная станция, г. Волгодонск, Россия

В настоящей работе обоснован выбор модели для оценки поступления трития в атмосферу при охлаждении воды в брызгальных бассейнах Ростовской АЭС. В основе модели лежит фундаментальная термодинамическая закономерность формирования насыщенного водяного пара над поверхностью воды. Экспериментальным путем подтвержден эмпирический коэффициент, связывающий интенсивность поступления трития в атмосферу с активностью трития в воде, площадью брызгальных бассейнов и разностью парциальных давлений насыщенного пара при температуре воды и температуре воздуха. Для климатических условий размещения Ростовской АЭС значение коэффициента составило 0,32 л/(м^2·час·гПа). Разработанные метод и порядок проведения расчета выбросов тритиевой воды из брызгальных бассейнов в атмосферный воздух Ростовской АЭС позволяет оперативно контролировать воздействие на окружающую среду и гарантировать безопасность населения. В случае применения разработанного алгоритма для других климатических условий (других АЭС) потребуется экспериментальное определение значения эмпирического коэффициента на основе натурных измерений, аналогичных представленным в настоящей работе.

Ключевые слова: тритий, температура, влажность, испарение, активность, фактор разбавления.

1. Введение

Развитие и применение ядерных технологий способствует решению социальных и экономических проблем как в регионах присутствия объектов использования атомной энергии, так и страны в целом [1]. Производство электроэнергии на атомных электростанциях играет ключевую роль в предотвращении загрязнения окружающей среды выбросами и сбросами вредных химических веществ, захламления промышленными отходами [2]. Специфические виды воздействия АЭС, связанные с применением ядерных материалов и обращением с радиоактивными веществами, не создают угрозы персоналу, населению, окружающей среде при нормальных условиях эксплуатации.

Ключевым элементом подтверждения безопасности эксплуатации любой ядерной установки является систематический контроль поступления радиоактивных веществ в окружающую среду. Контроль поступления радионуклидов в атмосферный воздух на российских АЭС осуществляется для каждого стационарного источника, создающего при выбросе без учета рассеивания индивидуальную годовую эффективную дозу более 10 мкЗв; и для всех радионуклидов, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, суммарный вклад которых в годовую эффективную дозу облучения лиц из

критической группы населения, создаваемую выбросом этого источника, составляет не менее 99 %.

До 2012 г. тритий не входил в число радионуклидов, выбросы которых должны нормироваться и контролироваться при нормальной эксплуатации АЭС РФ. Вследствие этого отсутствовали приборы и методы для такого контроля [3]. В связи с существенными изменениями с 2012 г. в подходах к нормированию выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух потребовалось проведение масштабных исследований радионуклидного состава и активности газовоздушной смеси каждого источника выброса на всех российских АЭС [4]. По результатам радиационно-технических обследований источников выбросов радионуклидов АЭС России (филиалов АО «Концерн Росэнергоатом») установлено, что тритий входит в число пятнадцати радионуклидов, определяющих не менее 99 % дозы облучения критической группы населения от выбросов АЭС [5, 6].

При работе ядерного реактора соединения трития могут поступать в атмосферу как от организованных стационарных источников (трубы вентиляционной системы), так и неорганизованных стационарных источников, таких как брызгальные бассейны [7, 8]. Брызгальные бассейны (далее ББ) на АЭС применяются в качестве промышленных систем охлаждения [9]. Охлаждение воды в ББ происходит за счет испарения. Применяемая на АЭС система предупреждения формирования взрывоопасной смеси водорода и кислорода переводит все изотопы водорода в оксидную форму H_2O. Наиболее вероятное соединение воды, содержащей тритий (T), – HTO, крайне редко DTO и T_2O (где D – дейтерий, не радиоактивный изотоп водорода с атомной массой 2). При испарении воды, содержащей тритий, формируется источник поступления трития в атмосферу. Так, вклад трех ББ в суммарный выброс трития из всех нормируемых источников Ростовской АЭС составляет 45 %.

Организованные стационарные источники выброса АЭС России оснащены пробоотборными устройствами для отбора образцов воздуха на определение содержания трития, что позволяет определить среднесрочное поступление трития в атмосферу и сравнить с установленным нормативом. Для неорганизованных стационарных источников нет возможности контролировать выбросы трития инструментальными методами. Чтобы контролировать соблюдение нормативов выброса трития из неорганизованных источников требуется разработать, обосновать методику расчета выброса трития на основе измерения физических параметров, однозначно связанных с интенсивностью выброса трития. До начала практического применения такой методики выбранный алгоритм расчета выброса трития из ББ, учитывающий характерные климатические условия района размещения АЭС, должен быть подтвержден экспериментально.

2. Материалы и методы

2.1. *Основная модель оценки поступления трития в атмосферу при охлаждении воды в брызгальных бассейнах*

Метод расчета выброса трития из брызгальных бассейнов при охлаждении воды основан на оценке интенсивности испарения. Количество испаряемого пара с поверхности воды определяется установленным термодинамическим равновесием с жидкостью. Оценка интенсивности испарения опирается на:

- метеорологические данные о температуре и об относительной влажности воздуха в окрестности ББ;
- расчетные данные о парциальном давлении насыщенных паров воды над поверхностью бассейна при температуре воздуха, равной температуре воды, поступающей в бассейны;

- расчетные данные о парциальном давлении насыщенных паров воды в атмосферном воздухе вне бассейна.

Для оценки поступления трития из ББ Ростовской АЭС в атмосферу консервативно принимается, что вода в форме НТО испаряется так же, как и обычная вода в форме H_2O, а плотность воды 1 кг/л не изменяется при изменении температуры. Эти допущения гарантированно предотвращают заниженную оценку выброса трития из ББ.

В качестве основной модели для оценки интенсивность испарения воды с площади ББ выбрана формула Дальтона, имеющая широкое применение для расчета интенсивности испарения влаги с открытых водных поверхностей бассейнов (D, л/ч) и именуемая в инженерных справочниках всего мира как формула стандарта VDI 2089 или Общества немецких инженеров [10]:

$$D = 10^{-5}\cdot\varepsilon\cdot S\cdot(P^b - P^l), \quad (1)$$

где S – площадь брызгального бассейна, м^2;

P^b – давление водяных паров насыщенного воздуха при температуре воды (t_w), поступающей в брызгальный бассейн в сутки d, Па;

P^l – парциальное давление водяных паров при температуре (t_a) и относительной влажности воздуха по данным метеостанции за сутки d, Па;

ε – эмпирический коэффициент, учитывающий назначение бассейна и, как следствие, изменение эффективной площади испарения, л/(м^2·час·Па).

Для перехода от интенсивности испарения (D, л/ч) к мощности выброса трития (Q, Бк/ч) при испарении воды в ББ с учетом принятых консервативных условий, необходимо значение интенсивности испарения умножить на значение удельной активности трития (С, Бк/л) в воде ББ:

$$Q = D\cdot C = 10^{-5}\cdot\varepsilon\cdot S\cdot(P^b - P^l)\cdot C, \quad (2)$$

где D – интенсивность испарения воды с площади каждого ББ по формуле (1), л/ч;

C – удельная активность трития в воде ББ, Бк/л.

На Ростовской АЭС эксплуатируется три брызгальных бассейна одинаковой площади. Интенсивность выброса трития (Q, Бк/ч) при испарении воды в ББ является величиной аддитивной. Таким образом, суммарная интенсивность выброса трития из трех брызгальных бассейнов будет равна сумме интенсивности выброса из каждого ББ. Выброс трития из каждого ББ определяется разностью парциальных давлений насыщенных паров воды над поверхностью каждого из трех ББ и в атмосферном воздухе вне каждого ББ, удельной активностью трития в воде ББ и площадью неорганизованного источника. Принятые условия консервативности, выбранная модель (2) и результаты экспериментальной работы позволяют применить в качестве расчетного алгоритма интенсивности выброса трития ($\underline{Q}_h^{\text{неорг}}$, Бк/ч) из трех брызгальных бассейнов Ростовской АЭС следующую формулу [7, 10]:

$$\underline{Q}_h^{\text{неорг}} = \sum_j \quad \underline{Q}_{j,h}^{\text{неорг}} = \sum_j \quad 0{,}32\cdot S_j\cdot\left(P_{j,d}^b - P_d^l\right)\cdot C_{j,d}, \quad (3)$$

где 0,32 – эмпирический коэффициент, л/(м^2·час·гПа);

S_j – площадь j-го брызгального бассейна, м^2;

$P_{j,d}^b$ – давление водяных паров насыщенного воздуха при температуре воды ($t_{j,w}$), поступающей в j-й брызгальный бассейн за сутки d, гПа;

P_d^l – парциальное давление водяных паров при температуре ($t_{a,d}$) и относительной влажности воздуха по данным близлежащей к Ростовской АЭС метеостанции за сутки d, гПа;

$C_{j,d}$ – среднее значение удельной активности трития в воде *j*-го брызгального бассейна за сутки d, Бк/л;

$\underline{Q}_{j,h}^{\text{неорг}}$ – среднее за каждый час суток значение мощности выброса трития при испарении воды из *j*-го брызгального бассейна, Бк/ч.

Среднее значение суточного выброса трития в форме НТО ($\underline{Q}_{d}^{\text{неорг}}$) из трех брызгальных бассейнов Ростовской АЭС равно сумме выброса из каждого ББ ($\underline{Q}_{j,h}^{\text{неорг}}$) за одни сутки (Бк/сут):

$$\underline{Q}_{d}^{\text{неорг}} = 24 \cdot \sum_{j} \quad \underline{Q}_{j,h}^{\text{неорг}}. \tag{4}$$

Значение выброса трития в форме НТО из каждого ББ Ростовской АЭС в среднем за месяц определяется по формуле (Бк/мес):

$$\underline{Q}_{j,m}^{\text{неорг}} = \sum_{d=1}^{30} \quad \underline{Q}_{j,d}^{\text{неорг}}. \tag{5}$$

Активность годового выброса трития в форме НТО из каждого ББ Ростовской АЭС за год выполняется по формуле (Бк/год):

$$\underline{Q}_{j}^{\text{неорг}} = \sum_{m=1}^{12} \quad \underline{Q}_{j,m}^{\text{неорг}}. \tag{6}$$

Аналитическое выражение для расчета парциального давления паров воды при заданной температуре *t* представлено в виде экспоненциальной зависимости, (Па) [11]:

$$P_{d} \ = \ 1{,}84 \cdot 10^{11} exp\left(-\frac{5330}{273{,}15+t}\right). \tag{7}$$

В инженерных справочниках иногда предлагаются другие выражения для расчета парциального давления паров воды при заданной температуре. Сравнение результатов расчета по формуле (7) с альтернативными формулами показало отличие значений парциального давления паров воды в диапазоне температур от 5 до 35 °С – не более 0,5 %, для других возможных температур при нормальной эксплуатации ББ – не более 1,5 % [10].

Для расчета $P_{j,d}^{b}$ по формуле (7) величина *t* принимается равной значению температуры воды ($t_{j,w}$), поступающей в *j*-й брызгальный бассейн по данным объектовой системы постоянного контроля температуры воды в среднем за сутки *d*, (Па):

$$P_{j,d}^{b} \ = \ 1{,}84 \cdot 10^{11} exp\left(-\frac{5330}{273{,}15+t_{j,w}}\right), \tag{8}$$

где $t_{j,w}$ – средняя за сутки d температура воды, поступающей в *j*-й брызгальный бассейн, °С.

При расчете P_{d}^{l} по формуле (7) требуется учитывать значение относительной влажности воздуха (*φ*), а величина *t* принимается равной значению температуры атмосферного воздуха ($t_{a,d}$) в районе размещения АЭС по данным объектовой системы мониторинга метеорологических характеристик окружающей среды в среднем за сутки *d*:

$$P_{d}^{l} \ = \varphi \ \cdot 1{,}84 \cdot 10^{11} exp\left(-\frac{5330}{273{,}15+t_{a,d}}\right), \tag{9}$$

где *φ* – средняя за сутки относительной влажности воздуха, %;

$t_{a,d}$ – средняя за сутки d температура атмосферного воздуха в районе размещения Ростовской АЭС, °С.

2.2. *Валидация основной модели*

Валидация основной модели для расчета величин выбросов трития из брызгальных бассейнов Ростовской АЭС в атмосферный воздух проведена путем сравнения количественных характеристик выбросов радионуклида, полученных на основе инструментальных измерений и расчетным путем по формуле (3). В период с 22 по 23 июня 2021 г. выполнен отбор проб воздуха для определения объемной активности (ОА) трития в приземном слое воздуха вблизи брызгальных бассейнов Ростовской АЭС. Для отбора проб воздуха использовались три мобильные установки отбора проб трития (УОТ). УОТ устанавливались у каждого ББ в направлении движения потока воздуха на расстоянии 25 м от водной поверхности. Схема расположения установок отбора проб трития (УОТ) возле каждого ББ представлена на рис.1.

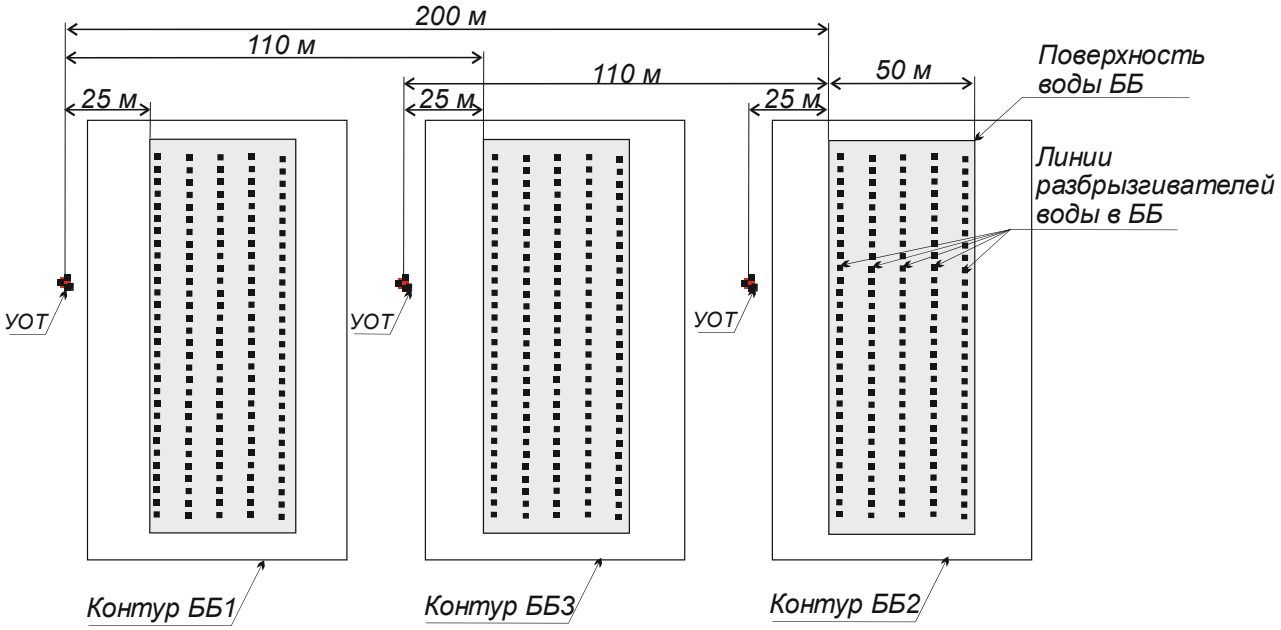


Рисунок 1. Схема расположения УОТ возле каждого ББ

Каждая УОТ позволяет в двух параллельных пробоотборных линиях производить отбор проб воздуха для получения двух счетных образцов для определения ОА трития в приземном слое воздуха в месте установки УОТ. Методика определения ОА трития в приземном слое воздуха – «Методика измерений объёмной активности трития в приземной атмосфере и газообразных выбросах с использованием установки автоматизированной пробоотбора трития и углерода УОТ-02» зарегистрирована в федеральном информационном фонде аттестованных методик ФР.3.38.2020.00132. Измерения активности счетных образцов выполнены методом жидкой сцинтилляционной спектрометрии.

Измеренные значения ОА трития в воздухе на заданном расстоянии от каждого ББ позволили рассчитать соответствующую интенсивность выброса трития из ББ с учетом фактического разбавления примеси в атмосфере, характерного для интервала времени проведения эксперимента. Эта величина может быть определена согласно методике разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух [12]:

$$Q^T = C_n^T(x)/G_n^T(x), \tag{10}$$

где Q^T – мощность непрерывного выброса трития из ББ, Бк/с;

$C_n^T(x)$ – измеренное значение приземной объемной активности трития на расстоянии *x* от границы ББ в направлении *n*-го румба движения потока воздуха, Бк/м^3;

$G_n^T(x)$ – значение (метеорологического) фактора разбавления примеси в приземном слое воздуха для трития на расстоянии *x* от границы ББ в направлении *n*-го румба, с/м^3.

Расчет метеорологического фактора разбавления в каждой точке измерения ОА трития, если рассматривать ситуацию суточного отбора пробы воздуха как сценарий последовательных разовых выбросов в трехчасовые интервалы времени, допустимо проводить согласно методике для залпового выброса радиоактивных веществ [13]. Сценарий формирования источника – ветровой унос с площадного источника шириной 50 м и высотой выброса 1 м.

Сравнение результатов расчета по формуле (10) с результатами расчета по формуле (3) за один и тот же интервал времени дает возможность сделать вывод о применимости алгоритма расчета интенсивности выброса трития из ББ, адекватности выбранной физической модели и достоверности предложенного алгоритма. Такое сравнение требуется проводить с учетом объективного свойства аддитивности интенсивности выброса трития во времени. Поскольку размерность результатов расчета в формуле (10) представлена в Бк/с, то и результаты расчета по формуле (3) необходимо перевести в размерность Бк/с.

Наряду с валидацией алгоритма расчета интенсивности выброса трития из ББ на основе выбранной модели выполнена его верификация путем сравнения с результатами расчета альтернативным алгоритмом.

2.3. *Верификация основной модели*

Для верификации формулы расчета величины выброса трития из ББ Ростовской АЭС рассмотрены по отдельности два пути формирования выброса:

- за счет испарения с поверхности струй и капель непосредственно на площади ББ (P_1);
- за счет испарения капель воды (каплеунос), унесенных за пределы площади ББ (P_2).

В основе первой оценки лежит фундаментальная теплофизическая закономерность – при парообразовании часть тепла жидкости расходуется на совершение работы по преодолению сил сцепления между молекулами конденсированной среды (жидкой воды) при увеличении объема тела (образования пара). В результате происходит изменение внутренней энергии конденсированного вещества и его охлаждение. Таким образом, изменение температуры воды на входе и выходе из ББ будет пропорционально массе испарившейся жидкости. Согласно многочисленным опубликованным справочным материалам, рекомендациям и методическим указаниям расчет потерь воды ББ на испарение в процентах от производительности описывается эмпирической формулой [14, 15]:

$$P_1 = K \cdot \Delta t, \tag{11}$$

где Δt – перепад температур воды на входе и выходе из ББ, °С;

K – коэффициент, зависящий от температуры воздуха, %/°С.

Для брызгальных бассейнов значение *K* приводится в табл. 1.

Таблица 1. Значение коэффициента *K* для температуры воздуха

Температура воздуха, °С	0	10	20	30	40
Коэффициент *K*, %/°С	0,1	0,12	0,14	0,15	0,16

Для оценки второго пути формирования выброса в атмосферу трития из ББ Ростовской АЭС за счет каплеуноса и последующего испарения таких капель используются эмпирические данные о потерях воды из системы охлаждения в результате капельного уноса. Согласно справочным данным [3, 9] и рекомендациям такие потери для ББ с производительностью от 500 до 5 000 м^3/ч без каплеуловителя могут составить 1,5 % от расхода воды. Если консервативно принять, что все унесенные из ББ капли воды испарились в короткое время, игнорировать частичный сток обратно в ББ и инфильтрацию в грунт, то значение P_2 также можно считать равным 1,5 %.

3. Результаты

3.1. Валидация формулы расчета величин выбросов трития из брызгальных бассейнов Ростовской АЭС в атмосферный воздух

Инструментальный метод. Для валидации расчетного метода путем сравнения с экспериментальными данными инструментального метода выбран интервал времени с максимальными сезонными температурами атмосферного воздуха и высоким значением активности трития в воде брызгальных бассейнов. Данные об активности трития в воде каждого ББ и результаты измерения ОА трития в приземном слое атмосферы в 25 м от водной поверхности ББ обобщены в табл. 2. Характеристики атмосферы, учитываемые при определении мощности выброса и параметров разбавления паров НТО в атмосфере в период отбора проб воздуха, представлены в табл. 3.

Среднее значение ОА трития в приземном слое в направлении движения потока воздуха на расстоянии 25 м от водной поверхности ББ составило: для ББ1 – 651,5 Бк/м^3; для ББ2 – 257,0 Бк/м^3; для ББ3 – 1109,0 Бк/м^3. В период отбора проб направление движение ветра было со стороны ББ2 на ББ3 и далее на ББ1. Выбросы трития из ББ2 с учетом фактора разбавления могли оказывать влияние на формирование ОА трития в приземном слое атмосферы вблизи ББ3 и ББ1.

Значение фактора метеорологического разбавления в фиксированной точке отбора пробы воздуха специфично для каждой категории устойчивости и наблюдаемой скорости ветра в период отбора. Полученные значения фактора метеорологического разбавления каждой категории устойчивости представлены в табл. 4.

Для каждого интервала наблюдения комбинация категории устойчивости атмосферы и скорости ветра из табл. 3 определяет фактор разбавления по табл. 4. Полученные в результате инструментальных измерений средние значения ОА трития в воздухе вблизи каждого ББ и установленные значения фактора метеорологического разбавления позволяют оценить мощность выброса для каждого рассматриваемого интервала времени в период отбора проб воздуха (см. табл. 5).

Средние значения мощности выброса из каждого ББ за рассматриваемые интервалы времени позволяют оценить суммарную активность поступившего в атмосферу трития из всех трех ББ в $1{,}01 \cdot 10^{11}$ Бк; при этом средняя мощность выброса из всех ББ суммарно составила $9{,}33 \cdot 10^5$ Бк/с.

Таблица 2. Содержание трития в воде ББ и приземном слое атмосферы

Брызгальный бассейн	Содержание трития		
	В воде ББ, Бк/л	В приземной атмосфере, проба 1, Бк/м^3	В приземной атмосфере, проба 2, Бк/м^3
ББ 1	43 000	625 ± 157	678 ± 110
ББ 2	32 200	315 ± 80	199 ± 50
ББ 3	56 000	840 ± 210	1 378 ± 344

Таблица 3. Характеристика атмосферы в период отбора проб воздуха

Дата, время	Ветер, дующий с	Скорость ветра, м/с	Категория устойчивости атмосферы	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %
23.06.21 15:00	СВ	4,0	B	33,1	39
23.06.21 12:00	СВ	3,0	A	31,9	39
23.06.21 09:00	ВСВ	3,0	B	26,6	50
23.06.21 06:00	СВ	2,0	D	24,1	57
23.06.21 03:00	СВ	3,0	F	25,4	46
23.06.21 00:00	В	2,0	G	25,9	46
22.06.21 21:00	В	3,0	E	30,2	37
22.06.21 18:00	ВСВ	3,0	D	32,3	37
22.06.21 15:00	ВСВ	3,0	B	31,7	39
22.06.21 12:00	ВСВ	3,0	A	29,9	44

Таблица 4. Значения метеорологического фактора разбавления $G_n^T(x)$ на расстоянии 25 м от поверхности воды ББ

Скорость ветра, м/с	Метеорологический фактор разбавления, с/м^3					
	A	B	C	D	E	F
2,0	$1{,}65\cdot10^{-3}$	$2{,}83\cdot10^{-3}$	$3{,}35\cdot10^{-3}$	$3{,}98\cdot10^{-3}$	$6{,}81\cdot10^{-3}$	$1{,}32\cdot10^{-2}$
3,0	$1{,}10\cdot10^{-3}$	$1{,}89\cdot10^{-3}$	$2{,}23\cdot10^{-3}$	$2{,}65\cdot10^{-3}$	$4{,}54\cdot10^{-3}$	$8{,}83\cdot10^{-3}$
4,0	$8{,}27\cdot10^{-4}$	$1{,}41\cdot10^{-3}$	$1{,}67\cdot10^{-3}$	$1{,}99\cdot10^{-3}$	$3{,}41\cdot10^{-3}$	$6{,}62\cdot10^{-3}$

A, B, C – разная степень неустойчивости (хорошие условия рассеивания), D – безразличное состояние, E и F – устойчивая стратификация (плохое рассеивание)

Таблица 5. Мощность выброса трития при испарении воды из ББ Ростовской АЭС на основе инструментального метода

Дата, время	Метеорологический фактор разбавления, с/м^3	Мощность выброса, Бк/с		
		ББ 1	ББ 2	ББ 3
23.06.21 15:00	$1{,}41\cdot10^{-3}$	$4{,}62\cdot10^{5}$	$1{,}82\cdot10^{5}$	$7{,}87\cdot10^{5}$
23.06.21 12:00	$1{,}10\cdot10^{-3}$	$5{,}92\cdot10^{5}$	$2{,}34\cdot10^{5}$	$1{,}01\cdot10^{6}$
23.06.21 09:00	$1{,}89\cdot10^{-3}$	$3{,}45\cdot10^{5}$	$1{,}36\cdot10^{5}$	$5{,}87\cdot10^{5}$
23.06.21 06:00	$3{,}98\cdot10^{-3}$	$1{,}64\cdot10^{5}$	$6{,}46\cdot10^{4}$	$2{,}79\cdot10^{5}$
23.06.21 03:00	$8{,}83\cdot10^{-3}$	$7{,}38\cdot10^{4}$	$2{,}91\cdot10^{4}$	$1{,}26\cdot10^{5}$
23.06.21 00:00	$1{,}32\cdot10^{-2}$	$4{,}94\cdot10^{4}$	$1{,}95\cdot10^{4}$	$8{,}40\cdot10^{4}$
22.06.21 21:00	$4{,}54\cdot10^{-3}$	$1{,}44\cdot10^{5}$	$5{,}66\cdot10^{4}$	$2{,}44\cdot10^{5}$
22.06.21 18:00	$2{,}65\cdot10^{-3}$	$2{,}46\cdot10^{5}$	$9{,}70\cdot10^{4}$	$4{,}18\cdot10^{5}$
22.06.21 15:00	$1{,}89\cdot10^{-3}$	$3{,}45\cdot10^{5}$	$1{,}36\cdot10^{5}$	$5{,}87\cdot10^{5}$
22.06.21 12:00	$1{,}10\cdot10^{-3}$	$5{,}92\cdot10^{5}$	$2{,}34\cdot10^{5}$	$1{,}01\cdot10^{6}$
Среднее значение за период наблюдения		$3{,}01\cdot10^{5}$	$1{,}19\cdot10^{5}$	$5{,}13\cdot10^{5}$
Мощность выброса трех ББ за период наблюдения		$9{,}33\cdot10^{5}$		

Расчетный метод (основная модель). Оценка мощности выброса трития из ББ расчетным путем по алгоритму настоящей методики (формула 3) выполнена для метеорологических условий и температурного режима воды ББ в период с 22.06.2021 по 23.06.2021. Расчет интенсивности выброса трития проведен как для отдельных интервалов времени, соответствующих рассмотренным интервалам в инструментальном методе (табл. 6 и 7), так и по усредненным параметрам за весь период наблюдения.

Температура воды во всех ББ по данным автоматической системы контроля составляла 22,5 °С. Давление водяных паров насыщенного воздуха при температуре воды 22,5 °С, рассчитанное по формуле (8), составляет 27,25 гПа. Данные метеонаблюдений о температуре и относительной влажности воздуха в период отбора проб (см. табл. 3) позволяют определить парциальное давление водяных паров в районе расположения ББ и рассчитать разницу между ним и давлением водяных паров насыщенного воздуха при температуре воды в ББ для каждого рассматриваемого трехчасового интервала времени в период отбора проб воздуха. Согласно расчетной формуле 3 настоящей методики, полученное значение разности давлений, удельная активность воды в ББ (см. табл. 2), площадь каждого ББ (8 580 м^2) и эмпирический коэффициент (0,32 л/(м^2·час·гПа)) определяют мощность выброса трития из каждого ББ в среднем за каждый час в рассмотренных трехчасовых интервалах времени. Результаты расчета мощности выброса в размерности Бк/с по расчетному алгоритму методики (формула 3) представлены в табл. 6.

Таблица 6. Мощность выброса трития при испарении воды из ББ Ростовской АЭС на основе расчетного метода

Дата, время	Парциальное давление водяных паров, гПа	Мощность выброса, Бк/с		
		ББ 1	ББ 2	ББ 3
23.06.21 15:00	19,83	$2{,}43\cdot10^5$	$1{,}82\cdot10^5$	$3{,}17\cdot10^5$
23.06.21 12:00	18,52	$2{,}86\cdot10^5$	$2{,}14\cdot10^5$	$3{,}73\cdot10^5$
23.06.21 09:00	17,43	$3{,}22\cdot10^5$	$2{,}41\cdot10^5$	$4{,}19\cdot10^5$
23.06.21 06:00	17,11	$3{,}32\cdot10^5$	$2{,}49\cdot10^5$	$4{,}33\cdot10^5$
23.06.21 03:00	14,93	$4{,}04\cdot10^5$	$3{,}02\cdot10^5$	$5{,}26\cdot10^5$
23.06.21 00:00	15,39	$3{,}89\cdot10^5$	$2{,}91\cdot10^5$	$5{,}07\cdot10^5$
22.06.21 21:00	15,93	$3{,}71\cdot10^5$	$2{,}78\cdot10^5$	$4{,}83\cdot10^5$
22.06.21 18:00	17,98	$3{,}04\cdot10^5$	$2{,}28\cdot10^5$	$3{,}96\cdot10^5$
22.06.21 15:00	18,31	$2{,}93\cdot10^5$	$2{,}19\cdot10^5$	$3{,}82\cdot10^5$
22.06.21 12:00	18,62	$2{,}83\cdot10^5$	$2{,}12\cdot10^5$	$3{,}69\cdot10^5$
Среднее значение за период наблюдения		$3{,}23\cdot10^5$	$2{,}42\cdot10^5$	$4{,}20\cdot10^5$
Мощность выброса трех ББ за период наблюдения		$9{,}85\cdot10^5$		

Полученные средние значения мощности выброса из каждого ББ расчетным методом (по основной модели) за рассматриваемые интервалы времени дают оценку суммарной активности поступившего в атмосферу трития из всех трех ББ на уровне $1{,}06\cdot10^{11}$ Бк; средняя мощность выброса из всех трех ББ Ростовской АЭС составила $9{,}85\cdot10^5$ Бк/с.

3.2. Верификация формулы расчета величин выбросов трития из брызгальных бассейнов Ростовской АЭС в атмосферный воздух

Для верификации модели расчета выбросов трития из ББ Ростовской АЭС по формуле (11) использованы теплофизические характеристики сред за рассматриваемый период времени (табл. 7). По данным табл. 7 рассчитаны значения интенсивности потерь воды в ББ за счет испарения (табл. 8).

В результате, зная содержание трития в воде каждого ББ (см. табл. 2), мы оценили его выброс при испарении воды за рассмотренный период на уровне $4{,}16\cdot10^9$ Бк для ББ1; $1{,}50\cdot10^9$ Бк для ББ2 и $7{,}60\cdot10^7$ Бк для ББ3. Суммарное количество трития, поступившего в атмосферу при испарении воды из всех трех ББ, составило $5{,}74\cdot10^9$ Бк. С учетом известного значения P_2 (1,5 %), а также данных о расходе воды в ББ (3 000 м^3/ч) и о содержании трития в воде каждого ББ были получены значения поступления трития в атмосферу при каплеуносе: $5{,}81\cdot10^{10}$ Бк из ББ1; $4{,}35\cdot10^{10}$ Бк из ББ2 и $7{,}56\cdot10^9$ Бк из ББ3. Суммарное количество трития, поступившего в атмосферу при каплеуносе воды из всех трех ББ, составило $1{,}09\cdot10^{11}$ Бк.

Общее количество поступившего в атмосферу трития при испарении воды (P_1) во всех трех ББ и каплеуносе воды (P_2) из всех трех ББ оценивается в $1{,}15\cdot10^{11}$ Бк.

Таблица 7. Теплофизические характеристики сред для расчета Р1 при испарении воды в ББ

Дата, время	Температура воздуха, °С	Значение коэффициента *К*, %/°С	Перепад температур, °С		
			ББ 1	ББ 2	ББ 3
23.06.21 15:00	33,1	0,154	0,7	0,1	0,1
23.06.21 12:00	31,9	0,153	0,9	0,2	0,0
23.06.21 09:00	26,6	0,147	0,7	0,3	0,1
23.06.21 06:00	24,1	0,144	0,7	0,4	0,1
23.06.21 03:00	25,4	0,146	0,6	0,5	0,2
23.06.21 00:00	25,9	0,146	0,5	0,5	0,2
22.06.21 21:00	30,2	0,151	0,6	0,5	0,2
22.06.21 18:00	32,3	0,153	0,8	0,3	0,1
22.06.21 15:00	31,7	0,153	0,8	0,3	0,2
22.06.21 12:00	29,9	0,151	0,8	0,4	0,1

Таблица 8. Потеря воды при испарении воды из ББ Ростовской АЭС

Дата, время	Значение P_1 за интервал (3ч), %			Потеря воды на испарение за интервал (3ч), м^3		
	ББ 1	ББ 2	ББ 3	ББ 1	ББ 2	ББ 3
23.06.21 15:00	0,11	0,01	0,02	10,2	0,9	1,4
23.06.21 12:00	0,14	0,03	0,00	12,4	2,8	0,0
23.06.21 09:00	0,10	0,05	0,02	8,8	4,4	1,8
23.06.21 06:00	0,10	0,06	0,02	9,1	5,2	1,7
23.06.21 03:00	0,09	0,07	0,03	8,3	6,6	2,6
23.06.21 00:00	0,08	0,07	0,03	7,0	6,6	3,1
22.06.21 21:00	0,09	0,07	0,03	8,2	6,3	2,7
22.06.21 18:00	0,12	0,04	0,01	11,0	3,7	0,9
22.06.21 15:00	0,13	0,05	0,03	11,4	4,1	2,7
22.06.21 12:00	0,12	0,07	0,02	10,4	5,9	1,4
Суммарное значение за период наблюдения				96,9	46,5	18,3

4. Обсуждение

Сравнение результатов в табл. 5 и 6 показывает, что предлагаемый расчетный алгоритм оценки мощности выброса трития из брызгальных бассейнов Ростовской АЭС является более консервативным, чем инструментальный метод, и на 5,6 % завышает значение мощности выброса. Консервативный характер расчетного алгоритма гарантированно обеспечивает безопасность для населения и окружающей среды при контроле выбросов трития из ББ Ростовской АЭС. Усреднение значений парциального давления водяных паров за весь период наблюдения не приводит к изменению результата оценки характеристики площадного источника выброса трития Ростовской АЭС.

Сравнение результатов оценок поступления трития в атмосферу из ББ Ростовской АЭС на основе инструментального метода и расчетных методов на основе

термодинамического подхода (формула Дальтона) и учет испарения с каплеуносом показал приемлемый уровень консерватизма расчетного подхода, предложенного в настоящей работе (табл. 9).

Таблица 9. Результаты оценки выброса трития из ББ различными методами

Метод	Мощность выброса, Бк/с	Суммарная активность, Бк	Отличие мощности от инструментальной оценки, %
Инструментальный	$9{,}33 \cdot 10^5$	$1{,}01 \cdot 10^{11}$	–
Расчетный	$9{,}85 \cdot 10^5$	$1{,}06 \cdot 10^{11}$	5,6
Верификация (испарение + каплеунос)	$1{,}06 \cdot 10^6$	$1{,}15 \cdot 10^{11}$	13,6

Обоснованный алгоритм расчетного метода позволяет определить нижнюю границу контролируемого годового выброса трития из брызгальных бассейнов Ростовской АЭС для характерных метеоусловий каждого месяца (среднесуточная температура и относительная влажность воздуха). Минимальный контролируемый годовой выброс трития гипотетически может произойти при активности трития в воде каждого ББ ниже порога измерения (далее НПИ) применяемого метода (10 Бк/л). В этом случае в формуле (3) применяется значение удельной активности трития, равное 0,5 НПИ (5 Бк/л). Для среднесуточной температуры воды 20 °С и среднесуточной относительной влажности воздуха 50 % минимальное контролируемое значение годовой активности выброса трития из брызгальных бассейнов Ростовской АЭС составит $5{,}53 \cdot 10^9$ Бк/год.

Установленные на момент проведения исследования нормативы выброса трития для трех ББ Ростовской АЭС составляли $4{,}89 \cdot 10^{13}$ Бк/год и $2{,}45 \cdot 10^{14}$ Бк/год для допустимого выброса (ДВ) и предельно допустимого выброса (ПДВ) трития за год соответственно. Предлагаемый расчетный метод позволяет регистрировать годовое поступление трития в атмосферу при охлаждении воды в брызгальных бассейнах на уровне 0,011 % от установленного значения ДВ и 0,002 % от установленного значения ПДВ. При фактическом выбросе трития из всех ББ Ростовской АЭС $2{,}86 \cdot 10^{12}$ Бк/год разработанный метод, с показанным минимальным контролируемым значением, обеспечивает контроль за поступлением трития, начиная с 0,2 % реального поступления трития в атмосферу.

5. Выводы

Предложенный в настоящей работе расчетный алгоритм оценки мощности выброса трития из брызгальных бассейнов на основе фундаментальной термодинамической закономерности – формирования насыщенного водяного пара над поверхностью воды – является более консервативным, чем инструментальный метод на основе измерений объемной активности трития вблизи источников с учетом процессов его разбавления в приземной атмосфере. Результаты валидации показывают, что алгоритм примерно на 6 % завышает значение мощности выброса, и это дополнительно обеспечивает запас по уровню безопасности для населения и окружающей среды при контроле выбросов трития из ББ Ростовской АЭС. Верификация предложенного алгоритма указывает на то, что он учитывает формирование выброса трития из ББ как за счет испарения с поверхности струй и капель непосредственно на площади ББ, так и за счет испарения капель воды, унесенных за пределы площади ББ.

Расчетный метод многократно сокращает затраты на контроль поступления трития из ББ. На результаты расчетного метода не влияют важнейшие динамические

метеопараметры (скорость и направление ветра), определяющие количество и месторасположение точек отбора проб воздуха. Этот метод может быть использован для инвентаризации источников выбросов трития, обоснования нормативов выброса трития и контроля за соблюдением установленных нормативов выброса трития из ББ Ростовской АЭС, а также для контроля радиационной обстановки в районе расположения Ростовской АЭС. Допускается применение расчетного метода для оценки воздействия на окружающую среду паров воды, содержащих тритий, при испарении в процессе ее охлаждения в ББ энергоблока № 1 с реакторной установкой ВВЭР-1000 Ростовской АЭС.

Разработанный и подтвержденный экспериментально алгоритм расчета выбросов трития в атмосферный воздух из брызгальных бассейнов основан на климатических условиях, характерных для района размещения Ростовской АЭС. Применение данного алгоритма для других АЭС в полном объеме невозможно, так как эмпирический коэффициент в расчетной формуле специфичен для климатических условий района размещения Ростовской АЭС. Применение разработанного алгоритма в других климатических условиях потребует экспериментального определения значений эмпирического коэффициента на основе натурных измерений, аналогичных представленным в настоящей работе.

Минимальное контролируемое значение годового поступления трития в атмосферу при охлаждении воды в брызгальных бассейнах Ростовской АЭС, равное $5{,}53 \cdot 10^9$ Бк/год, гарантирует адекватный контроль за соблюдением установленных нормативов выбросов трития и подтверждение соблюдений условий радиационной безопасности при эксплуатации стационарных неорганизованных источников выброса трития.

6. Список литературы

1. Nuclear power and sustainable development // International Atomic Energy Agency. 2016. Vienna: IAEA.
2. Горин Н.В., Екидин А.А., Головихина О.С. Атомная энергетика в национальных проектах России // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2021. № 1. С. 5-15.
3. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций. (СП АС-03) СанПиН 2.6.1.24-03. М.: 2003.
4. Курындин А.В., Шаповалов А.С., Тимофеев Н.Б. О методах выбора нормируемых радионуклидов и источников выброса при разработке нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух // Ядерная и радиационная безопасность. 2019. № 2 (92). С. 17-23.
5. Vasyanovich M., Vasilyev A., Ekidin A., Kapustin I., Kryshev A. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases // Nuclear Engineering and Technology. 2019. Vol. 51. No. 4. P. 1176-1179.
6. Vasyanovich M.E., Ekidin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I., Sazykina T.G., Kosykh I.V., Kapustin I.A. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 208-209. 106006.
7. Екидин А.А., Антонов К.Л., Васильев А.В., Васянович М.Е., и др. Оценка поступления трития в атмосферу из брызгальных бассейнов балаковской АЭС в холодный период // Ядерная и радиационная безопасность, 2017, № 3(85). С. 35-46.
8. Vasilyev A., Ekidin A., Vasyanovich M., Pyshkina M., Antonov K., Antushevskiy A., Semenov M., Murashova E. Conservative tritium exposure assessment in the

atmosphere from the spray ponds of the Balakovo NPP // Fusion Science and Technology. 2020. Vol. 76. No 4. С. 526-535.
9. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 20-2016. Промышленные системы охлаждения. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Москва, бюро НДТ, 2016.
10. Зеликов В.В. Справочник инженера по отоплению, вентиляции и кондиционированию: Справочник / В.В. Зеликов. - М.: Инфра-Инженерия, 2011. - 624 с.
11. СП 50.13330.2012 «Свод правил. Тепловая защита зданий. Thermal performance of the buildings».
12. Методика разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух (ПДВ-2012). Зарегистрирована Министерством юстиции Российской Федерации от 18.01.2013 № 26595.
13. Руководство по безопасности. Рекомендуемые методы оценки и прогнозирования радиационных последствий аварий на объектах ядерного топливного цикла. РБ-134-17. ФБУ «НТЦ ЯРБ». 2017, Москва.
14. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие/ Под общ. ред. В. с. Пономаренко. М.: Энергоатомиздат: 1998. 376 с.
15. В.Н.Козин, Ю.И.Лазаренко, Н.Т.Наталюк, Б.А.Шиманский. Методические указания по предотвращению образования минеральных и органических отложений в конденсаторах турбин и их очистке. РД 34.22.501-87 «Союзтехэнерго».

Сведения об авторах:

Екидин Алексей Акимович, ИПЭ УрО РАН, к.ф.-м.н., в.н.с. г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20, ekidin@mail.ru

Антонов Константин Леонидович, ИПЭ УрО РАН, к.ф.-м.н., с.н.с. г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

Васянович Максим Евгеньевич, ИПЭ УрО РАН, к.ф.-м.н., н.с. г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

Пышкина Мария Дмитриевна, ИПЭ УрО РАН, м.н.с. г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

Меркулов Александр Федорович, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», начальник отдела радиационной безопасности, г. Волгодонск, Ростовская АЭС

Фоменко Павел Александрович, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», заместитель начальника отдела радиационной безопасности, г. Волгодонск, Ростовская АЭС

SUBSTANTIATION OF THE METHOD FOR ASSESSING THE TRITIUM RELEASE INTO THE ATMOSPHERE WHEN COOLING WATER IN THE SPRAY PONDS OF THE ROSTOV NPP

A. A. Ekidin [1], K. L. Antonov [1], M. E. Vasyanovich [1], M. D. Pyshkina [1], A.F. Merkulov [2], P.A. Fomenko [2]

[1] Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
[2] Branch of JSC Rosenergoatom Concern Rostov Nuclear Power Plant, Volgodonsk, Russia

In this paper, we substantiate the choice of a model for estimating the tritium release into the atmosphere during water cooling in the spray ponds of the Rostov NPP. The model is based on a fundamental thermodynamic regularity for water to form saturated water vapor above its surface. An empirical coefficient was confirmed experimentally that relates the intensity of tritium entry into the atmosphere with the activity of tritium in water, the area of spray pools, and the difference in partial pressures of saturated steam at water temperature and air temperature. For the climatic conditions of the Rostov NPP location, the value of the coefficient was 0.32 l/(m^2 h hPa). The method and procedure for calculating the release of tritium water from spray ponds into the atmosphere near the Rostov NPP allows you to quickly control the impact on the environment and guarantee the safety of the population. In the case of applying the algorithm for other climatic conditions (other nuclear power plants), it will be necessary to experimentally confirm the value of the empirical coefficient based on field measurements similar to those presented in this paper.

Key words: tritium, temperature, humidity, evaporation, activity, dilution factor

References

1. Nuclear power and sustainable development // International Atomic Energy Agency. 2016. Vienna: IAEA.
2. Gorin N.V., Ekidin A.A., Golovihina O.S. Nuclear Power Engineering as an Important Element of Russia's National Priority Projects. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernaya energetika. 2021. № 1. P. 5-15. (In Russian).
3. Sanitarnye pravila proektirovaniya i ekspluatacii atomnyh stancij. (SP AS-03) SanPiN 2.6.1.24-03. M.: 2003.
4. Kuryndin A.V., Shapovalov A.S., Timofeev N.B. On methods for selection of radioactive airborne discharge sources and radionuclides for which discharge limits shall be set. Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost'. 2019. № 2 (92). P. 17-23. (In Russian).
5. Vasyanovich M., Vasilyev A., Ekidin A., Kapustin I., Kryshev A. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases. Nuclear Engineering and Technology. 2019. Vol. 51. No. 4. P. 1176-1179.
6. Vasyanovich M.E., Ekidin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I., Sazykina T.G., Kosykh I.V., Kapustin I.A. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population. Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 208-209. 106006.
7. Ekidin A.A., Antonov K.L., Vasil'ev A.V., Vasyanovich M.E., et al. Assessment of tritium escape from atmosphere from the spray ponds of the Balakovo NPP in cold season. Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost', 2017, № 3(85). P. 35-46. (In Russian).
8. Vasilyev A., Ekidin A., Vasyanovich M., Pyshkina M., Antonov K., Antushevskiy A., Semenov M., Murashova E. Conservative tritium exposure assessment in the

atmosphere from the spray ponds of the Balakovo NPP. Fusion Science and Technology. 2020. Vol. 76. No 4. P. 526-535.
9. Informacionno-tekhnicheskij spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. ITS 20-2016. Promyshlennye sistemy ohlazhdeniya. Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. Moskva, byuro NDT, 2016. (In Russian).
10. Zelikov V.V. Spravochnik inzhenera po otopleniyu, ventilyacii i kondicionirovaniyu: Spravochnik. V.V. Zelikov. - M.: Infra-Inzheneriya, 2011. - 624 p. (In Russian).
11. SP 50.13330.2012 «Svod pravil. Teplovaya zashchita zdanij. Thermal performance of the buildings». (In Russian).
12. Metodika razrabotki i ustanovleniya normativov predel'no dopustimyh vybrosov radioaktivnyh veshchestv v atmosfernyj vozduh (PDV-2012). Zaregistrirovana Ministerstvom yusticii Rossijskoj Federacii ot 18.01.2013 № 26595. (In Russian).
13. Rukovodstvo po bezopasnosti. Rekomenduemye metody ocenki i prognozirovaniya radi-acionnyh posledstvij avarij na ob"ektah yadernogo toplivnogo cikla. RB-134-17. FBU «NTC YARB». 2017, Moskva. (In Russian).
14. Ponomarenko V.S., Aref'ev YU.I. Gradirni promyshlennyh i energeticheskih predpriyatij: Spravochnoe posobie/ Pod obshch. red. V. s. Ponomarenko. M.: Enerroatomizdat: 1998. 376 p. (In Russian).
15. V.N.Kozin, Yu.I.Lazarenko, H.T.Natalyuk, B.A.SHimanskij. Metodicheskie ukazaniya po predotvrashcheniyu obrazovaniya mineral'nyh i organicheskih otlozhenij v kondensatorah turbin i ih ochistke. RD 34.22.501-87 «Soyuztekhenergo». (In Russian).

УДК 621.039:316.6

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЩЕСТВЕННОГО МНЕНИЯ В ИНТЕРЕСАХ РАЗВИТИЯ И ПРИЗНАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ

Н. В. Горин [1], А. А. Екидин [2], В. П. Кучинов [3], Л. Г. Матвеева [4], В. Ф. Меньшиков [5]

[1] ФГУП «Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина», г.Снежинск, Россия

[2] ФГБУН Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

[3] НИЯУ Московский инженерно-физический институт, г. Москва, Россия

[4]Информационный центр по атомной энергии, г. Челябинск, Россия

[5] Центр экологической политики России, г. Москва, Россия

Одной из главных движущих сил развития цивилизации в течение последних двух-трех столетий была энергетика, основанная на сжигании углеводородных энергоносителей, но одновременно она оказалась одной из причин загрязнения окружающей среды и, возможно, глобального потепления. В научной среде складывается понимание необходимости перехода на экологически чистую атомную энергетику с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ядерным топливным циклом, как основным источником энергии, и дополняющими ее возобновляемыми солнечной и ветровой энергоисточниками. Общественное мнение ещё не сложилось в пользу такого развития, а без поддержки населения, трансформирующегося в волю политиков, широкомасштабного использования атомной энергетики в мире не достичь. Поэтому формирование востребованного отношения населения к развитию атомной энергетики не только в отдельно взятой стране, но и в целом становится актуальным. Механизм такого формирования состоит в прямом и открытом взаимодействии специалистов атомной отрасли с общественностью, а самое главное, в обучении и воспитании студентов и школьников, т. е. в активной работе с молодежью.

Ключевые слова: атомная энергетика, парниковые газы, коммуникации, общественнее мнение, перспектива, молодёжь

1. Введение

Экономическое развитие стран и рост благополучия населения в них зависит от количества потребляемой энергии. Разрыв в душевом потреблением энергии в разных странах все еще велик, он достигает двух порядков между беднейшими и наиболее обеспеченными странами [1]. Преодоление такого разрыва, а также выполнение Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 г., принятой всеми государствами-членами ООН в 2015 г., потребует адекватного наращивания энергетических мощностей. Как представляется, широко пропагандируемые ветровая и солнечная генерации с такой задачей не справятся в силу имеющихся физических и технологических ограничений из-за низкой плотности потока энергии [2]. Генерация на углеводородном топливе обладает необходимой плотностью потока энергии, но при производстве более десятка млрд тонн нефтяного эквивалента энергии станет неприемлемой из-за уровня общих выбросов в атмосферу парниковых и других газов. Альтернативой может и должна стать

крупномасштабная атомная энергетика с быстрыми реакторами и замкнутым ядерным топливным циклом (ЯТЦ) [1]. Об этом говорилось на проходившей в Глазго в ноябре 2021 г. Конференции сторон Рамочной конвенции по изменению климата – COP26. В Глазго был отмечен значительный рост числа мероприятий, проведенных МАГАТЭ, Великобританией, Францией, Россией и США, связанных с мирным использованием ядерных технологий. Отмечалось, что атомная энергетика – это крупномасштабный концентрированный источник энергии, обеспечивающий круглосуточное электроснабжение, выбрасывает CO_2 на произведённый киловатт-час меньше, чем любая другая генерация в течение жизненного цикла [3, 4]. При этом ЯТЦ может эффективно работать с другими низкоуглеводным энергетическими системам с большой долей не стабильных возобновляемых источников, таких как ветер и солнце. В табл. 1 представлен уровень выбросов CO_2 в окружающую среду для разных станций, нормированный на 1 кВт·ч энергии [4]. Он может варьироваться в зависимости от региона и технологических решений.

Таблица 1. Грамм-эквивалент диоксида углерода для электростанций разных типов

Тип электростанции	г CO_2-экв/кВт·ч
Обычная угольная теплоэлектростанция (ТЭЦ)	751–1095
Угольная ТЭЦ с улавливанием и захоронением парниковых газов	147–469
Газовые электростанции комбинированного цикла	403–513
Газовые электростанции с улавливанием и захоронением парниковых газов	49–220
Гидроэлектростанции	6–147
Солнечные электростанции	8–122
Ветряные электростанции	8–23
Атомные электростанции (АЭС)	5,1–6,4

Топливно-энергетический комплекс генерирует ~75 % всех парниковых газов, преимущественно за счет сжигания угля, газа и нефтепродуктов, причем уровень выбросов CO_2 может варьироваться в зависимости от технологических процессов. Атомная станция CO_2 не производит, но в расчетах учтены усредненные величины выбросов при добыче, конверсии и обогащении урана, производстве топлива, строительстве, эксплуатации и вывода из эксплуатации АЭС, а также при обращении с отработавшим ядерным топливом, хранении и захоронении радиоактивных отходов.

В пунктах 36 и 37 заключительного документа конференции «Климатический пакт Глазго» отмечен лишь призыв ускорить разработку, внедрение и распространение технологий для перехода к энергетическим системам с низким уровнем выбросов, а также предложено рассмотреть дальнейшие меры по сокращению к 2030 г. выбросов парниковых газов, не связанных с диоксидом углерода, включая метан. Учитывая, что данный документ принимался консенсусом, можно, с одной стороны говорить, что в нем содержится косвенное поощрение развитие атомной энергетики, являющейся низкоуглеродной энергосистемой, а с другой – об отсутствии явной политической поддержки ее крупномасштабному развитию. Последнее связано с остающимся всё ещё отрицательным отношением общественности в атомной энергетике.

Актуальность энергетических и экологических проблем подтверждается позицией Президента и Правительства РФ [5], а МИД РФ назвал атомную энергетику и лесные проекты основными инструментами борьбы с изменением климата [6].

2. Механизмы взаимодействия с общественностью

Известно, что общественное мнение консервативно, изменяется медленно и трудно, а стереотипы и фобии возникают быстро. Показательны в этом смысле реакции населения на аварии на АЭС Три-Майл-Айланд, Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-Дайичи и последующее их изменение. При этом снижение негативного восприятия этих аварий и атомной энергетики у населения как затронутых стран, так и в целом происходило благодаря информационной и разъяснительной работе с разными возрастными и социальными группами населения, в том числе с авторитетными категориями населения.

Развитие коммуникаций ГК «Росатом» с общественностью описано [7] и представляет собой наглядный пример формирования, если ещё не востребованного отношения населения к развитию атомной энергетики, то как минимум не отрицательного к ней отношения. Вместе с тем опыт показывает, что эпизодические и разовые информационные мероприятия, простая демонстрация информации на специализированных сайтах для населения малопродуктивны. Так как формирование, как минимум, неотрицательного отношения к ЯТЦ у населения достигается медленно, требуется систематическая работа, учитывающая информационную работу активных противников развития атомной отрасли, использующих низкую экологическую и радиационную грамотность основной массы населения [8, 9].

Анализ коммуникаций населения с атомной отраслью России показал, что «…активные сторонники и противники атомной энергетики составляют в российском обществе явное меньшинство. Основная его часть находится где-то посередине между однозначным отрицанием ядерной энергетики как таковой и отношением к ней как перспективному, устойчивому способу энергообеспечения…» [10]. Имеет место существенное расхождение между мнением населения об опасности ЯТЦ, с одной стороны, современными знаниями и накопленным опытом – с другой. У населения существует неуверенность в обеспечении ядерной и радиационной безопасности современных и перспективных ядерных технологий в целом и ядерной энергетики в частности. Основные опасения связаны с возможностью аварий на АЭС и других объектах ядерной промышленности с выходом радиоактивности за пределы промышленных площадок. Также озабоченность населения вызывают методы обращения с радиоактивными отходами, реабилитации территорий и ликвидации накопленного ядерного наследия.

Заметную и часто негативную роль в формировании общественного мнения в отношении атомной энергетики играют средства массовой информации, где много вымысла и ошибок, граничащих с фальсификациями, а также общественные движения, лидеры которых преследуют собственные цели. В этих условиях любой человек, не имеющий специального образования, не сможет отделить правду от вымысла, ошибочного мнения и лжи. В то же время в относительно небольших населенных пунктах, где предприятия ЯТЦ являются градообразующими, подавляющее большинство населения поддерживает атомную отрасль и развитие ядерной энергетики, что можно объяснить их информированностью и радиационной грамотностью.

Из-за сложившихся стереотипов и фобий население, как правило, завышает риск возникновения аварий на ядерных объектах и драматизирует их возможные последствия, не интересуется существом вопроса, поэтому недостаточно информировано о результатах многолетних работ по повышению их безопасности, предупреждению аварийных ситуаций, снижению их тяжести и исключению выхода последствий аварий за пределы предприятия. Тем не менее в соответствии с законодательно установленными требованиями население имеет право на доступ к

информации, может и должно участвовать в принятии решений, влияющих на его образ жизни и благополучие. Действующее российское законодательство [11-13], рекомендации МАГАТЭ [14-16] и ряд международных документов предусматривают обязательное информирование населения обо всех значимых мероприятиях в атомной отрасли – о строительстве, модернизации и выводе из эксплуатации ЯРОО, изменениях особенностей его работы, радиационные инциденты, затрагивающих интересы населения и пр.

Понимая необходимость формирования востребованного отношения к развитию атомной энергетики и ее общественной поддержки, Госкорпорация «Росатом» ведёт информационную работу с разными группами населения, но основное внимание направляет на перспективу, на работу с молодыми специалистами, студентами [8-10]. Эффективным инструментом повышения осведомленности молодежи в вопросах радиационной безопасности является вовлечение студентов в мероприятия по общественному контролю объектов использования атомной энергии [17]. Молодёжь, хотя и настроенная критически, тем не менее легче усваивает новые знания. Главное внимание в стратегии формирования общественной приемлемости атомной энергетики следует уделять школьникам. Легче обучить в школе ребенка, чем переобучать уже сформировавшуюся личность. У школьника легче воспитать востребованное отношение к развитию экологически чистой атомной энергетики для решения проблем загрязнения окружающей среды, предотвращения роста парникового эффекта и, возможно, глобального потепления. Действующий при Госкорпорации «Росатом» Общественный совет активно взаимодействует с предприятиями отрасли, общественными объединениями, гражданами, органами местного самоуправления, профессиональными ассоциациями с целью поддержки решений в области использования ядерных технологий и развития атомной энергетики. Опыт Общественного совета в разрешении конфликтов информационных интересов показал:

- информирование населения – эффективный инструмент развития атомной отрасли;
- востребованное отношение у населения к атомной энергетике не появляется само по себе, а необходимо воспитывать.

Общественный совет организует в России общественные форум-диалоги как площадки для дискуссий и обмена опытом специалистов атомной отрасли, представителей органов власти, экспертов, экологов, широкой общественности в сфере безопасного развития ядерных технологий. Хорошо зарекомендовали себя и технические туры, в ходе которых общественность знакомится непосредственно с работой АЭС, а также работой других организаций, обеспечивающих её безопасное функционирование, включая обращение с радиоактивными отходами.

В 2019 г. такой форум-диалог совместно с выставкой «АтомЭко-2019» и проведением двух технических туров был впервые организован за рубежом – в Венгрии. Построенная СССР АЭС «Пакш» сегодня производит более 40 % электроэнергии в Венгрии, в 2014 г. подписано соглашение о сооружении двух новых энергоблоков, и в 2019 г. началось сооружение атомной электростанции «Пакш-2». Между регионами России и Венгрии и городами расположения АЭС наработан значительный опыт успешного взаимодействия в области экономического, культурного, образовательного сотрудничества.

На форуме 2019 г. с участием представителей международных организаций (МАГАТЭ, Агентство по ядерной энергии, Организация экономического сотрудничества и развития, Nuclear Transparency Watch), российских и венгерских общественных организаций (Эколого-правовой центр «Беллона», Общество

«Энергиаполитика 2000») были представлены итоги радиоэкологической оценки состояния окружающей среды вблизи строящейся Белорусской АЭС («нулевой» фон Белорусской АЭС). Для этого группа международных экспертов, представителей общественности, а также белорусской научно-исследовательской организации «Атомтех» провела мониторинг радиационной обстановки и отборы проб объектов окружающей среды вблизи Белорусской АЭС. В результате документально показано, что превышение естественного радиационного фона отсутствует, что совпадает с результатами государственного экологического мониторинга [18].

Независимый мониторинг радиоэкологической ситуации в г. Певек, где размещена плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) «Академик Ломоносов», реализован в 2021 г. силами экспедиции Общественного Совета и фонда «Ассоциация территорий расположения атомных электростанций», представителей общественных организаций, академической и науки высших учебных заведений. В присутствии представителей средств массовой информации из России, Германии, Франции, США на территории плавучей ПАТЭС и г. Певек проведены спектрометрические измерения радионуклидного состава поверхности грунтов. Они позволили оперативно ответить на вопрос о составе радионуклидов, формирующих внешнее облучение человека на обследуемой территории. Идентификация радионуклидов производилась непосредственно на месте измерения, без отбора проб. Результаты измерений демонстрировались и комментировались незамедлительно, процесс измерения и определения активности радионуклидов фиксировался телеоператорами СМИ (см. рис. 1). На территории ПАТЭС, в самом городе, на удаленных от города участках выполнено более 20 спектрометрических измерений.

Рисунок 1. Полевые спектрометрические измерения на территории ПАТЭС (Фото: Гаврилов Дмитрий / Фонд «АТР АЭС»)

Общественности было продемонстрировано, что радиационный фон в г. Певек и на прилегающей территории полностью сформирован естественными радионуклидами, искусственных техногенных из-за деятельности плавучей АЭС нет, и за два года эксплуатации она не повлияла на изменение радиоэкологической ситуации. Такие периодические выезды и демонстрации результатов измерений снимают опасения населения о безопасности проживания вблизи ЯРОО. При этом общественные организации способны указать на основные «горячие» вопросы к

объектам использования атомной энергии, а научное сообщество обеспечивает выбор приборов и методов для объективного ответа на запросы общества.

3. Работа со школьниками

Коммуникации ГК «Росатом» с общественностью направлены на решение как текущих проблем, так и перспективные направления работ, таких как формирование востребованного отношения к экологически чистой атомной энергетики в будущем [19]. Для этого необходимо изменить общественное мнение и поэтому основное внимание уделяется работе со школьниками. Очевидно, что после воспитания школьников с новым мировоззрением, которые очень быстро станут основным населением страны, начнет меняться и общественное мнение, ведущее к положительному восприятию ядерных и радиационных технологий и пониманию того, что только атомная энергетика способна производить достаточно энергии с минимальным воздействием на окружающую среду.

Одна из целей образования заключается в формировании у школьников стремления к определенной деятельности и выбору соответствующих вузов для продолжения обучения. В школьные годы многим часто попадают книги, которые производят неизгладимое впечатление, остаются в памяти на всю жизнь и подвигают на выбор профессии. Такие книги выпускает Госкорпорация «Росатом», в том числе с участием общественного совета. Одна из таких книг – «Символы Росатома» [20], она посвящена значимости ядерной отрасли. Тематические занятия со старшеклассниками [9, 21, 22], в преддверии выбора профессии, могут подвигнуть их на готовность связать свою судьбу с атомной отраслью. Однако для этого необходимо, чтобы у ученика сложился не просто положительный образ ядерной отрасли, но и романтический и захватывающий, что часто бывает в юном возрасте, и книга [20] может этому способствовать.

Для обучения детей и школьников младших классов подготовлена специальная детская литература, разработанная по заказу Общественного совета ГК «Росатом» или выпущенная АНО «Информационный центр атомной отрасли». Такая литература успешно используется в работе Информационных центров по атомной энергии (ИЦАЭ) со школьниками. Рассказывая об атомной отрасли, ИЦАЭ используют разные способы. Сеть информационных центров разрабатывает и проводит серию интерактивных занятий, рассказывающих о ядерных технологиях: круговорот энергии, ядерная медицина, чистая вода и опреснение, атомный флот и освоение Арктики, лазерные технологии, термоядерная энергетика и международный реактор ИТЭР, освоение дальнего космоса с помощью ядерных ракетных двигателей, квантовые компьютеры и др. Каждое занятие включает физическую активность, командную работу, игры и соревновательные механики. Гибкая структура занятий позволяет в режиме реального времени актуализировать информацию и варьировать уровень сложности в зависимости от характеристик аудитории.

Дополнить и расширить информацию можно, посещая и просматривая на YouTube-канале научно-популярные форматы ИЦАЭ, предназначенные для аудитории без ограничения возраста (школьники, студенты разных специальностей, работающие взрослые): научно-популярные ток-шоу «Разберем на атомы», «Суд над супергероями», «Наука в мемах», «Что и требовалось доказать!», устный журнал «Язык Эйнштейна», научно-музыкальное шоу «Квадрат эволюции», читки пьес о науке и ученых Science Drama. В библиотеке ИЦАЭ большое количество книг по истории атомной отрасли. В выставочных залах ИЦАЭ размещены интерактивные экспонаты: АЭС, синтезатор химических элементов, счетчик Гейгера, калькулятор профессий атомной отрасли. Мобильное приложение «Атом» позволяет играть в онлайн-формате, отвечать на вопросы онлайн-викторин, знакомиться с работой объектов

атомной отрасли с помощью дополненной реальности. Одним из ключевых мероприятий года в каждом городе присутствия ИЦАЭ является фестиваль науки «Кстати». В течение 3–5 дней несколько десятков экспертов из различных областей науки участвуют в десятках офлайн мероприятий с онлайн трансляциями и телемостами. Основная цель фестивалей – формирование научной картины мира, научного мировоззрения, знакомство с людьми, вооруженными знаниями и технологиями, мотивация к познанию.

5. Выводы

Атомная энергетика играет ключевую роль в предотвращении загрязнения окружающей среды выбросами и сбросами вредных химических веществ, захламления промышленными отходами. Современный уровень инженерно-технологических и организационных решений обеспечивает пренебрежимо малые риски для населения и окружающей среды от эксплуатации предприятий ЯТЦ. Крупномасштабное развитие атомной энергетики как в России, так и в мире способствует решению экологических проблем современности.

В настоящее время в России нет целенаправленного противодействия развитию радиационных и ядерных технологий. Негативное отношение населения к деятельности предприятий и институтов ЯТЦ часто формируется благодаря распространению вымыслов, фальсификаций и ошибочных суждений. Восприимчивость к такого рода негативной информации объясняется отсутствием специального образования у большинства населения, а также низкой осведомленностью и информированностью о комплексе сложных мер гарантирующих радиационную и ядерную безопасность объектов использования атомной энергии.

Формирование востребованного отношения к экологически чистой атомной энергетики должно происходить не эпизодически, а системно и на постоянной основе. Опыт взаимодействия Общественного совета ГК «Росатом», Информационных центров по атомной энергии, пресс-центров предприятий ЯТЦ с населением, общественными организациями, студентами и школьниками подчеркивает необходимость использовать адресный подход к каждой возрастной категории для эффективных коммуникаций.

6. Список литературы

1. Gorin N.V., Ekidin A.A., Golovikhina O.S. Nuclear Power in Russia’s National Projects // Nuclear Energy and Technology (NUCET). 2021. 7(3). P. 181–186
2. Капица П.Л. Энергия и физика: Доклад на научной сессии, посвященной 250-летию Академии наук СССР, Москва, 8 октября 1975 г. // Вестник АН СССР. 1976. № 1. С. 34–43.
3. International Atomic Energy Agency. Climate change and nuclear power 2018. Vienna, 2018.
4. Безуглеродный атом // Атомный эксперт, 2021, № 8, С. 4.
5. Прямая линия Президента РФ 30.06.21 // Вести [Электронный ресурс]. URL:https://www.vesti.ru/video/2313066 (23.05.2022).
6. МИД назвал основные инструменты борьбы с изменением климата [Электронный ресурс]. URL: https://ria.ru/20211102/mid-1757317457.html (23.05.22).
7. Головихина О.С., Горин Н.В., Игин И.М., Медянцев Н.В. Становление диалога госкоропорации «Росатом» с общественностью // Вестник Московского Университета. Серия 12. Политические науки. 2021. № 3. С. 78–97.
8. Горин Н.В., Головихина О.С., Глазов Е.Е., Екидин А.А., Нечаева С.В. Информирование населения, как инструмент развития атомной отрасли // Государственное управление. Электронный вестник. 2021. № 85. С. 6–24.

9. Горин Н.В., Екидин А.А., Нечаева С.В., Головихина О.С. Информационные интересы общества и объектов атомной отрасли: уроки конфликтов // Государственное управление. Электронный вестник. 2020. № 83. С.47–61.
10. Мельникова Н.В., Артемов Е.Т., Бедель А.Э., Волошин Н.П., Михеев М.В. История взаимодействия ядерной энергии и общества в России // Екатеринбург. 2018. Издательство Уральского университета. DOI 10.15826/B978-7996-2492-7.
11. Федеральный закон «Об экологической экспертизе» №174-ФЗ от 23.11.1995
12. Постановление правительства «Об утверждении положения о порядке проведения государственной экологической экспертизы» ПП РФ №698 от 11.06.1996.
13. Приказ Госкомэкологии РФ «Об утверждении Положения об ОВОС» №372 от 16.05.2000.
14. Привлечение заинтересованных сторон к решению ядерных вопросов. INSAG-20 // IAEA [Электронный ресурс]. URL: https://www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1276_R_web.pdf (дата обращения: 23.05.22).
15. Stakeholder Involvement Throughout the Life Cycle of Nuclear Facilities // IAEA [Электронный ресурс]. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1520_web.pdf (дата обращения: 23.05.22).
16. Communication and Stakeholder Involvement in Environmental Remediation Projects // IAEA [Электронный ресурс]. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1629_web.pdf (дата обращения: 23.05.22).
17. Носовец В.С., Мищенко Л.А., Миргородских К.С., Сахно К.С., Екидин А.А., Назаров Е.И. Опыт независимого радиационного контроля на общественно доступных участках зоны наблюдения ФГУП «ПО «Маяк» //Вопросы радиационной безопасности. 2022. № 1 (105). С. 3–10.
18. Екидин А.А., Васильев А.В., Васянович М.Е., Назаров Е.И., Пышкина М.Д., Ничипорчук А.О., Кожемякин В.А., Капустин И.А., Привалов И.А. Полевые методы исследования радиационной обстановки в районе размещения Белорусской АЭС в предэксплуатационный период. // АНРИ. 2020. № 2 (101). С. 31–44.
19. Горин Н.В., Абрамова Н.Л., Нечаева С.В., Головихина О.С. Воспитание у населения востребованного отношения к атомной энергетике // Государственное управление. Электронный вестник. 2021. № 87, С. 7–18. DOI: 10.24412/2070-1381-2021-87-7-18.
20. Коллектив авторов под руководством акад. Хазина А.Л. Символы Росатома // М.: ООО «Кей Групп». 2015.
21. Горин Н.В., Абрамова Н.Л., Матвеева Л.Г., Головихина О.С. Формирование у молодежи положительного образа Госкорпорации «Росатом» на примерах ликвидации ядерного наследия СССР // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию университета, Изд-во Курганского гос. ун-та, 2021, С. 109–116.
22. Горин Н.В., Абрамова Н.Л., Матвеева Л.Г., Головихина О.С. Содержание занятий со школьниками для ориентации их к выбору профессии в атомной отрасли // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию университета, Изд-во Курганского гос. ун-та, 2021, С. 117–124.

Сведения об авторах:

Горин Николай Владимирович, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ имени академика Е.И. Забабахина», к.ф.-м.н., в.н.с., 456770, Челябинская обл., г. Снежинск, ул. Васильева, n.gorin@vniitf.ru

Екидин Алексей Акимович, ИПЭ УрО РАН, к.ф.-м.н., в.н.с., г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20.

Кучинов Владимир Петрович, НИЯУ МИФИ, доцент, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31.

Матвеева Лариса Геннадьевна, Информационный центр по атомной энергии, канд. психол. наук, руководитель центра, 454020, г. Челябинск, ул. Энегельса, 107.

Меньшиков Валерий Федорович, Центр экологической политики России, к.т.н, член Совета центра, г. Москва, ул. Вавилова, д.33.

FORMING PUBLIC OPINION IN THE INTERESTS OF THE DEVELOPMENT AND RECOGNITION OF NUCLEAR ENERGY AS AN ENVIRONMENTALLY CLEAN ENERGY SOURCE

N. V. Gorin [1], A. A. Ekidin [2], V. P. Kuchinov [3], L. G. Matveeva [4], V. F. Menshikov [5]

[1] Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics named after Academician E. I. Zababakhin", Snezhinsk, Russia

[2] Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

[3] NRNU Moscow Engineering Physics Institute, Moscow, Russia

[4] Atomic Energy Information Center, Chelyabinsk, Russia

[5] Center for Environmental Policy of Russia, Moscow, Russia

Annotation

One of the main driving forces behind the development of civilization over the past two or three centuries has been energy based on the combustion of hydrocarbon energy carriers, but at the same time it turned out to be one of the causes of environmental pollution and, possibly, global warming. In the scientific community, there is an understanding of the need to switch to environmentally friendly nuclear energy with fast neutron reactors and a closed nuclear fuel cycle as the main source of energy, and renewable solar and wind energy sources that supplement it. Public opinion has not yet formed in favor of such a development, and without the support of the population, which is transforming into the will of politicians, the large-scale use of nuclear energy in the world cannot be achieved. Therefore, the formation of a demanded attitude of the population to the development of nuclear energy, not only in a single country, but in general, becomes relevant. The mechanism of such formation consists in direct and open interaction of nuclear industry specialists with the public, and most importantly in the education and upbringing of students and schoolchildren, i.e. in active work with young people.

Key words: nuclear energy, greenhouse gases, communications, public opinion, perspective, youth

References

1. Gorin N.V., Ekidin A.A. and Golovikhina O.S. 2021 Nuclear power in Russia's national projects Nucl. Ener. and Tech. (NUCET) 7(3) 181–6
2. Kapica P.L. Energy and Physics. // Report to the scientific session on the 250-th Anniversary of the USSR Academy of Sciences. Moscow. 08.10.75.
3. International Atomic Energy Agency. Climate change and nuclear power 2018. Vienna, 2018. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CCNAP-2018_web.pdf (accessed 23.05.22)

4. 2021 Carbon-free nuclear energy Atomic Expert №8. P. 4. (in Russian).
5. Direct line of the President of the Russian Federation 30.06.2021 // Vesti [Electronic resource]. URL: https://www.vesti.ru/video/2313066 (accessed 23.05.22) (in Russian).
6. The RF Ministry of Foreign Affairs named the main tools to combat climate change https://ria.ru/20211102/mid-1757317457.html (accessed: 23.05.22) (in Russian).
7. Golovikhina O.S, Gorin N.V, Igin I.M and Medyantsev N.V. Dialogue between State Atomic Energy Corporation «Rosatom» and wide public. Key initiatives and challenges. Moscow Uni. Bull. Series 12. Polit. Sci. 3 P. 78–97. (in Russian).
8. Gorin N.V., Golovikhina O.S., Glazov Y.E., Ekidin A.A. and Nechaeva S.V. Awareness-raising as a tool in developing the atomic industry. Publ. Admin. E-J. 2021. 85. P. 6–24. (in Russian).
9. Gorin N.V., Ekidin A.A., Nechaeva S.V. and Golovikhina O.S. Society and atomic industry enterprises information interests: experience of conflicts. Publ. Admin. E-J. 83. 2020. P. 47–61. (in Russian).
10. Melnikova N.V., Artemov E.T., Bedel A.E., Voloshin N.P. and Mikheev M.V. 2018 The History of Interaction between Nuclear Energy and Society in Russia (Yekaterinburg: Ural University Press) (in Russian).
11. Federal law On Ecological Expertise No. 174-FZ of 23.11.1995 (in Russian).
12. Government decree On Approval of the Regulations on the Procedure for Conducting Ecological Expertise RF PP No. 698 of 11.06.1996 (in Russian).
13. Order of the State Committee for Ecology of the Russian Federation On Approval of the Regulations on the Environmental Impact Assessment (EIA) No. 372 of 16.05.2000
14. Involvement of interested parties in the resolution of nuclear issues. INSAG-20 // IAEA: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1276_R_web.pdf (accessed 23.05.22)
15. Stakeholder involvement throughout the life cycle of nuclear facilities // IAEA: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1520_web.pdf (accessed 23.05.22)
16. Communication and stakeholder involvement in environmental remediation projects // IAEA: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1629_web.pdf. (accessed 23.05.22)
17. V.S. Nosovets, L.A. Mischenko, K.S. Mirgorodskikh, K.S. Sakhno, A.A. Ekidin, E.I. Nazarov Experience of independent radiation control in publicly accesible sites of the “FSUE Mayak PA” monitoring area //Voprosi radiacionnoj bezopasnosti. 2022. N 1 (105). pp. 3–10 (in Russian).
18. Ekidin A A, Vasilyev A V, Vasyanovich M. E, Nazarov E I, Pyshkina M D, Nichiporchuk A O, Kozhemyakin V A, Kapustin I A and Privalov I A 2020 Field methods for studying the radiation situation in the area of the Belarusian NPP in the pre-operational period ANRI 2 (101) pp 31–44 (in Russian).
19. Gorin N V, Abramova N L, Nechaeva S V and Golovikhina O S 2021 Fostering respectful attitude towards nuclear industry Publ. Admin. E-J. 87 pp 6–24 (in Russian).
20. Symbols of Rosatom 2015, ed Hasin A L (Moscow: LLC K-Group Publ.) (in Russian).
21. Gorin N V, Abramova N L, Matveeva L G and Golovikhina O S 2021 Formation of positive attitude towards State Atomic Energy Corporation "Rosatom" among youngsters using the example of the USSR nuclear heritage elimination Proc. of the Int. Sci. and Pract. Conf. ded. to the 70th anniv. of the University (Kurgan: Publ. H. of Kurgan State Uni.) pp 109–16 (in Russian).
22. Gorin N V, Abramova N L, Matveeva L G and Golovikhina O S 2021 Syllabus of lessons for high-school pupils to promote future choice of the career in the nuclear industry Proc. of the Int. Sci. and Pract. Conf. dedicated to the 70th anniv. of the University (Kurgan: Publ. H. of Kurgan State Uni.) pp 117–24 (in Russian).

УДК 57.088.6

УСКОРИТЕЛЬНАЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СВЕРХНИЗКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВИРУСНЫХ ЧАСТИЦ МЕЧЕННЫХ РАДИОУГЛЕРОДОМ

Е. А. Прокопьева [1,2], Е. В. Пархомчук [2,3]

[1] ФГБНУ Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины, г. Новосибирск, Россия

[2] Новосибирский государственный университет, ЦКП «УМС НГУ-ННЦ», г. Новосибирск, Россия

[3]ФГБУН Институт катализа им. Г. К. Борескова, г. Новосибирск, Россия

Изучение вирус-клеточного взаимодействия на примере обогащенного изотопом ^{14}C вируса гриппа позволяет определять сверхнизкие количества вирусных частиц в вируссодержащей жидкости, проникших во внутренние органы экспериментально инфицированных мышей. С целью определения концентраций вируса гриппа А разработан метод УМС-диагностики: в вируссодержащую жидкость вносят линкер EDC для связывания с эпитопами на поверхности вирионов; после инкубации, осаждения и отмывки добавляют меченную ^{14}C мочевину, которая замещает линкер EDC в местах связывания с COOH-группами эпитопов. Концентрацию вирусов, меченных радиоуглеродом, измеряют с помощью ускорительного масс-спектрометра, который способен детектировать от 10^7 шт. меченых вирионов в 1 г углерода органа мыши.

Ключевые слова: изотоп ^{14}C, мечение, вирион, грипп, вирус-клеточное взаимодействие, ускорительная масс-спектрометрия

1. Введение

Существуют различные количественные оценки вирусных частиц, среди которых наиболее часто применяются такие методы, как бляшкообразование; определение 50 %-го цитопатического действия, 50 %-й летальной дозы или 50 %-й эмбриональной дозы; иммуноферментные анализы; количественная полимеразная цепная реакция; реакция гемагглютинации; количественная электронная микроскопия [1]. Несмотря на широкий спектр способов количественной оценки вирусных частиц, в большинстве своем они определяют не физический титр частиц, а скорее, биологическую активность вируса, кроме того, имеется проблема точной оценки крайне малого количества патогенов. В качестве вирусного объекта нами был выбран вирус гриппа типа А, поскольку он является одним из представителей актуальных патогенов, способных поражать птиц, морских млекопитающих, лошадей, свиней и человека, а также, которые нередко становятся причиной возникновений масштабных эпидемий и пандемий [2]. В данной работе представлено описание разработанного нового метода диагностики вирус-клеточного взаимодействия на примере вируса гриппа А с введенной меткой радиоуглерода ^{14}C.

Известны методики мечения радиоактивными изотопами для определения опухолевых клеток *in vivo* путем радиоотображения, которые ранее применялись при диагностике различных онкологий (аденокарциномы, рака груди, нейробластом, рака желудка, меланомы) [3]. Существует довольно широкий спектр радионуклидов, пригодных для радиоотображения: ^{14}C, ^{32}P, ^{67}Ga, ^{99m}Tc, ^{111}In, ^{123}I, ^{125}I, ^{169}Yb, ^{186}Re, ^{188}Re. При диагностике вазоактивного кишечного рецептора в качестве радиотерапевтического агента применяется ^{186}Re или ^{188}Re [3]. В радиосцинтиграфии

используется метод радиойодирования, а для более качественного отображения достаточно широко применяют технеций [4]. Так, радиоактивный метод с применением ^{125}I использовали в генной инженерии при определении антител класса IgM к корантигену вируса гепатита В [5]. Однако получение радиойодированных пептидов − относительно дорогой и ограниченный по запасам реагента метод. Для сцинтиграфического радиоотображения предпочтение отдают ^{99m}Tc, а не радиойодированию, и тем не менее метод с использованием радионуклидов технеция не используется широко, поскольку не подходит для мечения белков, имеющих размер молекулы менее 10 тыс. дальтонов [6]. Радиоактивный фосфор (^{32}P) предлагается к выявлению фрагментов генома вируса инфекционного некроза поджелудочной железы. Недостатком данного способа авторы отмечают возможность ложноположительных результатов и высокую специфичность, нарастающую в случае измененного генотипа [7]. Изотопы углерода − радиоуглерод ^{14}C, а также стабильный изотоп ^{13}C − в составе меченой мочевины используются при бактериологическом исследовании желудочно-кишечного тракта на заражение Helicobacter pylori [8]. Во всех описанных случаях радионуклиды использовали в небезопасных для живого организма количествах. Предлагаемый нами метод основан на внесении радиоуглеродной метки в оболочку вируса без нарушения его жизнедеятельности и на дальнейшем определении вирусных частиц методом ускорительной масс-спектрометрии (УМС), при этом оценивается не радиоактивность, а количество меченых вирусов. Поскольку метод УМС позволяет проводить достоверные измерения концентрации изотопа ^{14}C при его доле 10^{-15} от общего содержания углерода, то появляется возможность определять предельно низкие концентрации вирусов. В данном методе выполняется подсчет количества вирионов в вируссодержащей жидкости (ВСЖ), а также определение числа проникших вирусных частиц в органы экспериментально инфицированных млекопитающих. Благодаря разработанному методу станет возможным углубленное изучение вирус-клеточного взаимодействия *in vitro* и *in vivo*, а также исследование механизма развития высоколетальной инфекции.

2. Материалы и методы

2.1 Культивирование клеток и титрование вирусов

Для разработки метода диагностики вирус-клеточного взаимодействия с помощью ускорительной масс-спектрометрии в качестве модельной системы использовали вирус гриппа A(H1N1)pdm09 (штамм A/Tomsk/273MA3/2010(H1N1pdm09) (MA-CD1), выделенный от человека и адаптированный к организму мышей путем слепого пассирования через легкие [9]. Разведение вируса готовили в поддерживающей питательной среде MEM (ООО «БиолоТ», Россия), содержащей 0,2 % V фракции бычьего сывороточного альбумина (ООО «БиолоТ», Россия), 2 мкг/мл трипсина TPCK (Sigma-Aldrich, США) и 50 мкг/мл гентамицина сульфата (ООО «БиолоТ», Россия). Разведение вируса рассчитывали исходя из инфекционного титра для культуры клеток MDCK, оцененного по методу Кербера, выраженного в lgТЦИД$_{50}$/мл (50%-я тканевая цитопатическая инфекционная доза в 1 мл), использовали дозу 100 ТЦИД$_{50}$ вируса. Затем ВСЖ фильтровали через фильтр 0,22 мкм и троекратно разбавляли физиологическим раствором с фосфатным буфером (PBS, pH 7,4). Осаждение вируса ультрацентрифугированием проводили на Beckman Scientific Inc. TL-100 Benchtop в течение 1 ч при 38 000 g и 4 °C. Мечение вирусов проводили с помощью меченой мочевины (препарат «Уреакапс», 37 кБк, АО НИФХИ им. Л.Я. Карпова) и кросс-линкера 1-этил-3-(3-диметиламинопропил) карбодиимида (EDC) (AppliChem, Германия). Меченые вирусные частицы титровали в

клетках собачьей почки Madin-Darby (MDCK) и проводили реакцию гемагглютинации (РГА).

Для анализа содержания радиоуглерода в вирусах методом УМС готовили пробы следующим образом: 10 мкл раствора меченой ВСЖ, предварительно разбавленного в 100 раз (10 мкл меченой ВСЖ + 990 мкл ФСБ), прикапали к навескам мелкозернистого плотного графита (МПГ), не содержащего радиоактивного ^{14}C (табл. 1). Затем пробы подвергли процедуре зауглероживания, которая проводилась на абсорбционно-каталитической установке в Институте катализа им. Г. К. Борескова СО РАН [10], включающей стадии сжигания, сорбции углекислого газа на селективном сорбенте, десорбции и каталитического восстановления CO_2 водородом (РФ 2638820, G01N 33/60, 2017). После завершения процесса зауглероживания порошок, содержащий 1 мг углерода, прессовали в таблетки и направляли на УМС-анализ. Процедуре графитизации, помимо исследовательских образцов, подвергали также стандартные образцы: щавелевой кислоты (OxI) и сахарозы (ANU). Относительное содержание радиоуглерода $^{14}C/^{13}C$ в исследовательских образцах нормировали на содержание $^{14}C/^{13}C$ в стандартах, получая отношения ^{14}C обр./ ^{14}C фон. Определение содержания радиоуглерода выполняли на уникальной научной установке «Ускорительный масс-спектрометр Института ядерной физики СО РАН» (УНУ «УМС ИЯФ СО РАН») [11].

2.2 Электронная микроскопия

Медную сетку TEM, 200 mesh (SPI Supplies, Уэст-Честер, Пенсильвания, США), покрытого ультратонкой формваровой пленкой-носителем, помещали на 10 мкл капли ВСЖ на 30 с, а затем сушили с помощью фильтровальной бумаги. Затем на поверхность сетки добавляли 10 мкл капли водного раствора уранилацетата (1 % по массе) в течение 15 с. После сушки, снова используя фильтровальную бумагу, сетку, исследовали с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (JEM-1400; Jeol, Япония) при ускоряющем напряжении 80 кВ.

2.3 Исследования in vivo

Все работы с животными одобрены Комитетом по биомедицинской этике при ФИЦ ФТМ.

Мышей линии BALB/c 6−8-недельных (масса тела 18–20 г) (питомник ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор», Кольцово) анестезировали диэтиловым эфиром (2–4 % во вдыхаемой смеси) и инфицировали интраназально 10^4 ТЦИД$_{50}$ вируса MA-CD1, меченным ^{14}C, в 50 мкл ФСБ.

Ежедневно в течение 8 суток проводили наблюдение за инфицированными мышами, оценивали поведение (активность, наличие аппетита), внешний вид животного, качество шерстного покрова, упитанность, наличие специфических клинических проявлений болезни (конъюнктивиты, выраженная дыхательная недостаточность, нервные проявления (парезы, параличи)).

При отсутствии летальности среди экспериментально инфицированных лабораторных мышей определяли патологическое влияние вируса гриппа MA-CD1, меченного ^{14}C, на организм экспериментальных животных по изменению массы и температуры тела животных опытных групп. Для этого получали данные о массе тела каждого животного ежедневно в течение всего срока наблюдения. Показатель изменения массы тела вычисляли как среднее арифметическое массы тела всех мышей в группе на 1, 2 и 3 сутки, соответственно. Измерение температуры тела производили в ушном канале при помощи инфракрасного электронного термометра Digital Veterinary Thermometer AccuVet. (Mesure technology Co., LTD.) и выражали в градусах Цельсия.

На 1, 2 и 3 сутки после инфицирования по три мыши умерщвляли путем декапитации. Для вирусологического и УМС-анализов брали легкие, трахею, сердце, печень, головной мозг, почку, тонкую кишку, толстую кишку. Инфекционные титры вируса гриппа определяли титрованием 10 %-го гомогената в культуре клеток MDCK, а также с помощью определения гемагглютинирующей единицы (ГАЕ) в 1 мл ВСЖ в РГА [12]. Значение ТЦИД$_{50}$/ мл рассчитывали по методу Кербера в модификации Ашмарина [13] и выражали в виде M±2σ, где M – среднее значение, σ – квадратичное отклонение. Определение статистической достоверности различий вирусных титров и морфометрических параметров в сравниваемых группах проводили методами вариационной статистики. Для УМС-анализа образцы биологических тканей сушили и подвергали зауглероживанию, как описано выше.

3. Результаты

Перед нанесением радиоактивной метки на вирионы требовалось очищение ВСЖ от остатков культуры клеток MDCK и других биомолекул, которые могут содержать карбоксильные группы. Для этого мы использовали простой и быстрый вариант очистки путем фильтрации через мембранные фильтры Millipor с диаметром пор 0,22 мкм и последующим ультрацентрифугированием. Этот метод обеспечивает высококачественную очистку вируса гриппа, но приводит к снижению его титра (с 640 до 320 ГАЕ/мл в нашем образце), поскольку некоторые вирионы остаются на поверхности мембранных фильтров Millipor. Таким образом, после процедуры ультрацентрифугирования количество вирионов в ВСЖ составило 320 ГАЕ/мл, что соответствует (64−128)·x 10^8 шт./мл вирионов, содержащих 10^{14} − 10^{15} шт. -COOH групп на эпитопах. Как было показано нами ранее [14], для внесения радиоактивной метки на поверхность вируса гриппа необходима активация карбоксильной группы белка, для чего был использован водорастворимый кросс-линкер – карбодиимид (1-ethyl-3(3-dimethylaminopropyl)carbodiimide, EDC, EDAC или EDCI) (рис. 1).

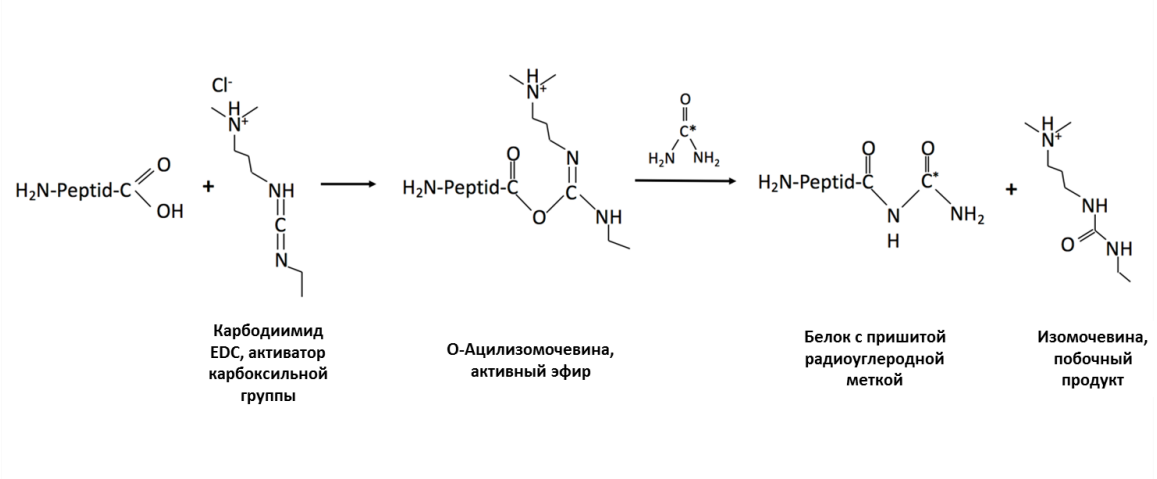


Рисунок 1. Схема связывания углерода карбоксильной группы, расположенной на поверхностном белке вируса гриппа, с азотом первичного амина через активацию карбоксильной группы белка кросс-линкером EDC

Примечание: схема связывания углерода карбоксильной группы представлена на примере мочевины, меченной ^{14}C; C* − радиоуглерод.

УМС-анализ показал (табл. 1), что в 10 мкл меченой вируссодержащей жидкости 1,6·10^{10} NC*ONH_2-групп, значит, в 1 мл вируссодержащей жидкости количество меченых NC*ONH_2-групп составляет 1,6·10^{12} шт. Если в 1 мл содержится (1,28−2,56) x·10^{10} шт. вирусов и (6,9−14) x·10^{14} шт. карбоксильных групп, то метка вносится на (0,1−0,3) % групп.

Таблица 1. Массы проб для УМС-анализа и содержание радиоуглерода в меченной ВСЖ

Номер пробы	1	2	3
Масса МПГ, мг	3,590	2,075	2,938
^{14}C обр./ ^{14}C фон	0,833	1,433	1,151
Количество ^{14}C в 10 мкл меченой ВСЖ	$1{,}5 \cdot 10^{10}$	$1{,}5 \cdot 10^{10}$	$1{,}7 \cdot 10^{10}$

Примечание: ВСЖ – вируссодержащая жидкость; МПГ – мелкозернистый плотный графит.

ПЭМ выявила структурную целостность мембран меченых вирионов (рис. 2), что свидетельствует о сохранности вирусных частиц после процедур очистки, концентрирования и мечения радиоуглеродом.

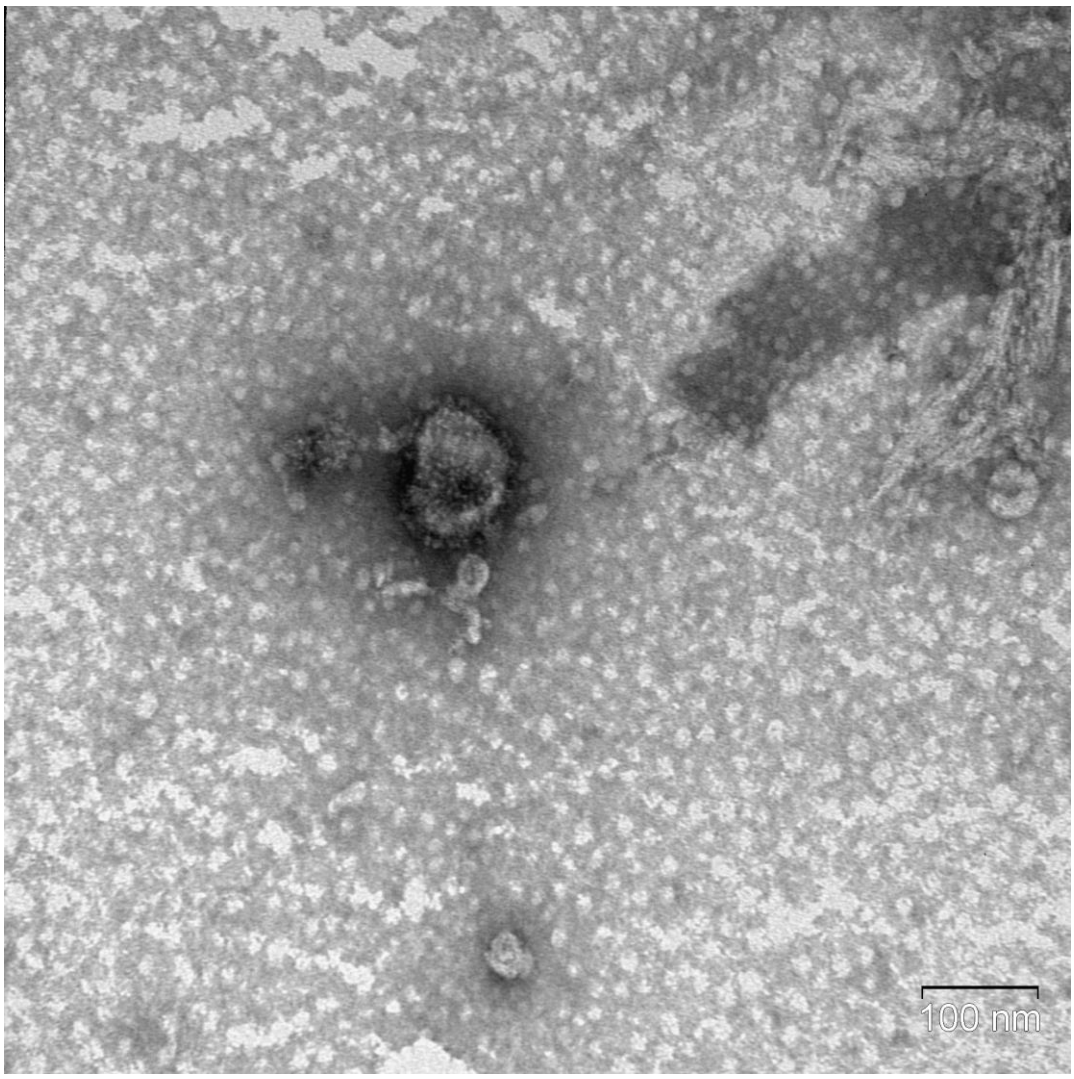


Рисунок 2. Изображение меченного радиоуглеродом вируса гриппа на ПЭМ

В результате инфицирования мышей линии BALB/c вирусом гриппа A/H1N1pdm09, меченным ^{14}C, отмечались признаки гриппозного заболевания в виде снижения массы тела и гипотермии (рис. 3, 4).

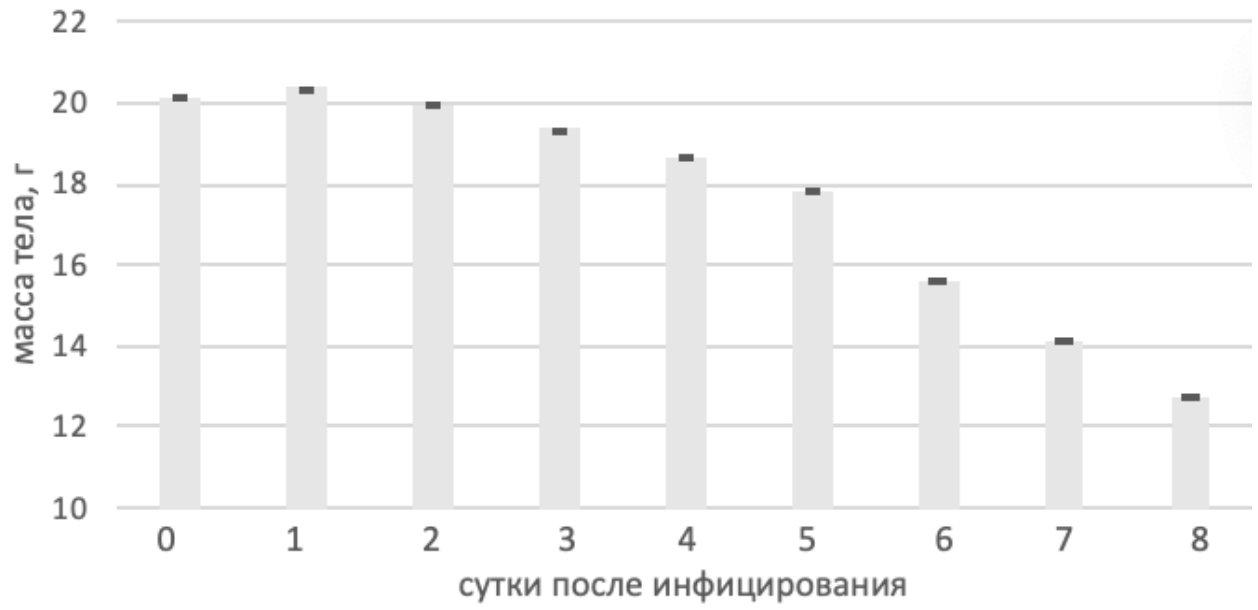


Рисунок. 3. Снижение массы тела у экспериментальных животных, инфицированных вирусом гриппа A/H1N1pdm09, меченным ^{14}C

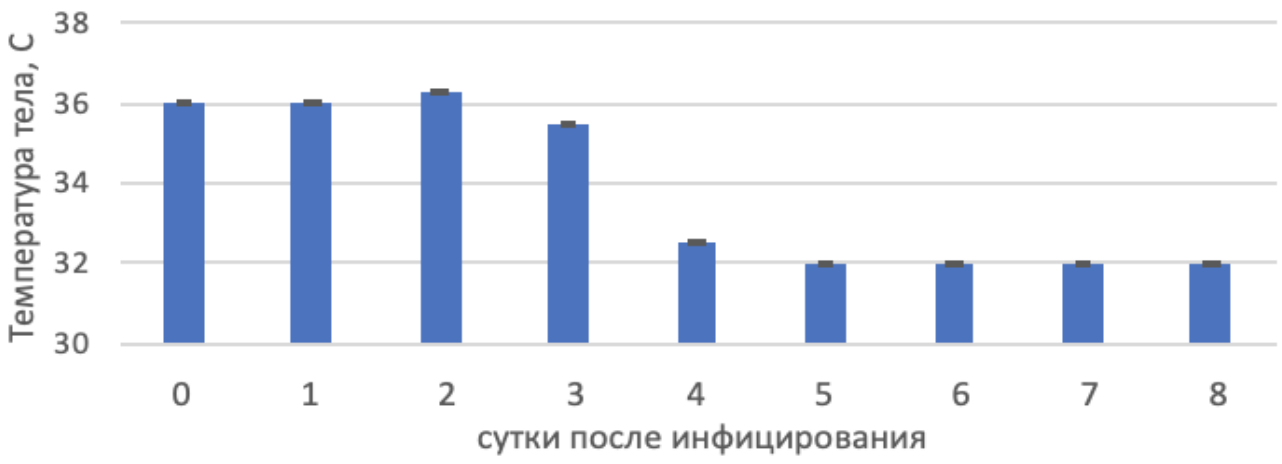


Рисунок 4. Изменение температуры тела у экспериментальных животных после инфицирования вирусом гриппа A/H1N1pdm09, меченным ^{14}C

Результаты определения инфекционного титра вируса, гемагглютинирующей активности, а также физического титра вируса методом УМС в органах лабораторных мышей (табл. 2) показали сохранность вирулентных свойств у меченого вируса.

Таблица 2. Сравнительный анализ вирусной нагрузки в органах мышей, экспериментально инфицированных вирусом гриппа A/H1N1pdm09 с меткой ^{14}C, измеренный с помощью вирусологических методов и УМС-анализа

	Титр вируса, lgТЦИД$_{50}$/мл[1]			РГА, ГАЕ/мл			УМС 10^7 шт. вирусов/1 г углерода органа		
	Сутки после инфицирования			Сутки после инфицирования			Сутки после инфицирования		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Легкие	5,1±0,18	4±0,24	4,8±0,14	4±1,63	13,3±3,8	16±0	413-1677	342-1387	324-1318
Трахея	2,5	1,5	1,5	32	8	32	6-25	41-166	43-173
Сердце	1,25	4,25	1,5	4	8	8	3-13	14-57	1-3
Печень	0	0	0	13,3±13,2	14,7±12,4	6,7±1,9	1-3	2-7	1-4
Почки	0,8±0,34	0	0	14,7±12,4	6,7±1,9	9	3-13	5-21	3-14
Мозг	0	0	0	0	0	0	1-2	2-7	1-2
Тонкий кишечник	0	0	0	48,0±22,6	37,3±19,9	45,3±26,4	2-7	35-142	0,1-0,8
Толстый кишечник	0	0	1,3±0,07	42,7±15,1	219±212	69,3±45,9	1-4	1-5	1-4

Примечание: [1] – титры вирусов выражены в lgТЦИД$_{50}$ (тканевая цитопатическая инфекционная доза) на 1мл исследуемого образца в виде M±m, где M – средняя арифметическая величина, а m – ошибка среднего; РГА – реакция гемагглютинации выражена в ГАЕ (гемагглютинирующая единица) в виде M±m, где M – средняя арифметическая величина, а m – ошибка среднего; УМС – ускорительный масс-спектрометр.

Полученные результаты, показав вирусологическую нагрузку во всех исследуемых органах с 1 по 3 сутки инфицирования, продемонстрировали высокую точность предложенного метода мечения вируса по сравнению с двумя классическими вирусологическими методами оценки.

4. Обсуждение

Предложенный нами метод диагностики вирусов и вирусных инфекций *in vitro* и *in vivo* основан на количественном подсчете радиоуглеродной метки, внесенной на оболочку вирусов без разрушения вирионов. С целью определения концентрации вирусов на примере вируса А разработан метод УМС-диагностики: в вируссодержащую жидкость вносят линкер EDC для связывания радиоуглеродной метки, находящейся в составе аминосодержащего вещества, с карбоксильными группами эпитопов на поверхности вирионов; после инкубации, осаждения и отмывки добавляют вещество, в котором есть изотоп ^{14}C и аминогруппа, вещество замещает линкер EDC в местах связывания с COOH-группами эпитопов. Содержание изотопа ^{14}C в вирусных препаратах измеряют с помощью ускорительного масс-спектрометра, который способен детектировать сверхнизкие концентрации частиц.

В проведенном нами исследовании была подтверждена сохранность вирулентных свойств у меченого вируса гриппа в исследованиях *in vitro* и *in vivo*. В процессе очистки ВСЖ от клеточного дебриса, последующего мечения и концентрирования с помощью ультрацентрифугирования титр вируса гриппа снижался, но незначительно. При инфицировании экспериментальных животных наблюдалось классическое течение гриппозной инфекции со снижением веса и гипотермии у последних. Методом УМС меченые вирусы обнаруживали во всех исследованных органах, наибольшая концентрация наблюдалась в легких и трахее. Стоит отметить, что во всех органах, за исключением легких, наблюдалось

увеличение концентрации меченых вирусов на вторые сутки после инфицирования, после чего концентрация падала.

Изучение вирус-клеточного взаимодействия методом ускорительной масс-спектрометрии на примере обогащенного изотопом ^{14}C вируса гриппа позволяет определить сверхнизкие количества проникших вирусных частиц, способных вызвать заболевание в органах экспериментально инфицированных млекопитающих. Кроме того, данный метод применим при анализе других вирусов и пептидов, содержащих на своей поверхности белки с COOH-группами в исследованиях *in vitro* и *in vivo*. Таким образом, данный метод может быть применен в медицинской биотехнологии, а именно как метод определения вирусных инфекций в вирусологии, например, для выявления и идентификации вируса гриппа А, определения специфичности онколитических вирусов и др.

5. Выводы

На примере вируса гриппа разработан метод количественной оценки вирусов и вирусных инфекций *in vitro* и *in vivo* с помощью радиоуглеродной метки и последующего УМС-анализа. Удалось зафиксировать от 10^7 шт. меченых вирионов в 1 г углерода органа мыши.

6. Благодарность

Авторы выражают особую признательность А. А. Чепурнову за помощь в проведении пробоподготовки вируса гриппа, Д. В. Кулешову за графитизацию биологических проб и С. А. Растигееву за измерения на ускорительном масс-спектрометре.

Данные исследования проведены при финансировании из государственного бюджета проекта № 122012400086-2, а также проекта № FSUS-2020-0036 (БЧ-2020-0036).

7. Список литературы

1. Karakus U., Cramer M., Lang C., Yangüez E. Propagation and Titration of Influenza Viruses. Methods Mol Biol. 2018. 1836 P. 59-88.
2. Kramer F., Smith G., Fouchier R., Paris M., Kedzierska K., Doherty P., Palace P., Shaw M., Treanor J., Webster R., Garcia-Sastre A. Influenza. Nat Rev Dis Primers 2018. 4, 3.
3. Меченые радиоактивным изотопом пептиды для диагностики и терапии RU 2171117 C2. Дин Р. Т., Пирсон Д. Э., Листер-джеймс Д., Сивителло Э. Р. https://yandex.ru/patents/doc/RU2171117C2_20010727
4. Радиоактивный иммунореагент направленного действия, композиция для получения изображения злокачественного новообразования в организме, способ получения изображения и комплексообразующий агент. RU 2122431 C1. Тоунер Д.Л., Хилборн Д.А., Мюррей Б.Д., Хауссейн Т.З., Сноу Р.А., Саха А.К., Филион Р., Ширман К.В., Шах Ч. https://yandex.ru/patents/doc/RU2122431C1_19981127;
5. Способ определения антител класса IgM к корантигену вируса гепатита В. SU 1 642 399 A1. Цибиногин В.В., Лосева В.Я. https://yandex.ru/patents/doc/SU1642399A1_19910415
6. Lamberts SW, Bakker WH, Reubi JC, et al. Receptors on tumors studied with radionuclide scintigraphy. J Nucl Med. 1991. 32. P. 1189–1191

7. Способ диагностики вируса инфекционного некроза поджелудочной железы лососевых методом полимеразной цепной реакции. RU 2 508 547 C2 Кандрина Н.Ю., Ломакина Н.Ф., Завьялова Е.А., Гулюкин М.И. https://yandex.ru/patents/doc/RU2508547C2_20140227 (RU 2508547, G01N 33/50, 2013)
8. Balon H.R., Roff E., Freitas J.E., Gates V., Dworkin H.J. Society of Nuclear Medicine Procedure Guideline for C-14 Urea Breath Test. J Nucl Med. 1998 Nov. 39(11). P. 2012-2014.
9. Адаптированные пандемические штаммы вируса гриппа A/Tomsk/273/2010-MA1(H1N1pdm09), A/Tomsk/273/2010-MA2(H1N1pdm09) и A/Tomsk/273/2010-MA3(H1N1pdm09) для оценки действия противовирусных препаратов (варианты). Прокопьева Е.А., Шестопалова Л.В., Шестопалов А.М. RU 2 605 317 C1 https://yandex.ru/patents/doc/RU2605317C1_20161220.
10. Lysikov A.I., Kalinkin P.N., Sashkina K.A., Okunev A.G., Parkhomchuk E.V., RastigeevS.A., Parkhomchuk V.V., Kuleshov D.V., Vorobyeva E.E., Dralyuk R.I. Novel Simplified Absorption-Catalytic Method of Sample Preparation for AMS analysis designed at the Laboratory of Radiocarbon Methods of Analysis (LRMA) in Novosibirsk Akademgorodok // International Journal of Mass-spectrometry. 2018. V. 433. P. 11-18.
11. Parkhomchuk V.V., Rastigeev S.A. Accelerator mass spectrometer of the center for collective use of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences // Journal of Surface Investigation. 2011. V. 5. I. 6. P. 1068-1072.
12. Manual for the laboratory diagnosis and virological surveillance of influenza. WHO Global Influenza Surveillance Network, 2011. 153p.
13. Ашмарин, И.П. Статистические методы в микробиологических исследованиях / И.П. Ашмарин, А.А. Воробьев. - М.:, Медгиз, 1962. - 179 с.
14. Прокопьева Е.А., Пархомчук Е.В., Соболев И.А., Шестопалов А.М. Разработка нового метода диагностики вирус-клеточного взаимодействия с помощью ускорительной масс-спектрометрии // Современные проблемы науки и образования. 2019. № 1. doi. 10.17513/spno.28463.

Сведения об авторах:

Прокопьева Елена Александровна, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины», кандидат биологических наук, доцент, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, 630090, e.prokopeva@g.nsu.ru;

Пархомчук Екатерина Васильевна, ФГБУН Институт катализа им. Г.К. Борескова, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 5, 630090.

ACCELERATOR MASS-SPECTROMETRY FOR DETECTING ULTRA-LOW CONCENTRATIONS OF VIRAL PARTICLES, LABELLED BY RADIOCARBON

E.A. Prokopyeva [1,2], E.V. Parkhomchuk [2,3]

[1] *Federal Research Center for Fundamental and Translational Medicine, Novosibirsk, Russia,*

[2] *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia,*

[3] *Institute of Catalysis named after G.K. Boreskov, Novosibirsk, Russia,*

Annotation - The study of virus-cell interaction on the example of influenza virus enriched with the ^{14}C isotope allowed us to determine the ultra-low amounts of viral particles in the virus-containing liquid and penetrated into the internal organs of experimentally infected mice. In order to determine the concentrations of influenza A virus, a method using AMS detection has been developed: an EDC linker is introduced into the virus-containing liquid to bind to epitopes on the surface of virions; after incubation, precipitation and washing, urea labelled by ^{14}C is added, which replaced the EDC linker at the sites of binding to the COON groups of epitopes. The labelled viruses are counted using an accelerator mass-spectrometer, which is capable of detecting ultra-low concentrations of labelled virions.

Key words: isotope ^{14}C, labeling, virion, influenza, virus-cell interaction, accelerator mass-spectrometry

References

1. Karakus U., Cramer M., Lang C., Yangüez E. Propagation and Titration of Influenza Viruses. Methods Mol Biol. 2018; 1836: 59-88. DOI: 10.1007/978-1-4939-8678-1_4.
2. Kramer F., Smith G., Fouchier R., Paris M., Kedzierska K., Doherty P., Palace P., Shaw M., Treanor J., Webster R., Garcia-Sastre A. Influenza. Nat Rev Dis Primers 4, 3 (2018). https://doi.org/10.1038/s41572-018-0002-y
3. Radioactive isotope labeled peptides for diagnosis and therapy RU 2171117 C2. Dean R.T., Pearson D.E., Lister-James D., Civitello E.R. https://yandex.ru/patents/doc/RU2171117C2_20010727
4. A directed radioactive immunoreagent, a composition for obtaining an image of a malignant neoplasm in the body, a method for obtaining an image and a complexing agent. RU 2122431 C1. Towner D.L., Hilborn D.A., Murray B.D., Haussein T.Z., Snow R.A., Saha A.K., Filion R., Shirman K.V., Shah Ch. https://yandex.ru/patents/doc/RU2122431C1_19981127
5. A method for determining antibodies of the IdM class to the hepatitis B virus corantigen. SU 1 642 399 A1. Cibinogin V.V., Loseva V.Ya. https://yandex.ru/patents/doc/SU1642399A1_19910415
6. Lamberts SW, Bakker WH, Reubi JC, et al. Receptors on tumors studied with radionuclide scintigraphy. J Nucl Med. 1991; 32: 1189-1191
7. A method for diagnosing the virus of infectious necrosis of the pancreas of salmon by polymease chain reaction. RU 2 508 547 S2 Kandrina N.Yu., Lomakina N.F., Zavyalova E.A., Gulyukin M.I. https://yandex.ru/patents/doc/RU2508547C2_20140227 (RU 2508547, G01N 33/50, 2013)
8. Balon H.R., Roff E., Freitas J.E., Gates V., Dworkin H.J. Society of Nuclear Medicine Procdure Guideline for C-14 Urea Breath Test. J Nucl Med. 1998 Nov;39(11): 2012-2014.

9. Adapted pandemic strains of influenza A virus/Tomsk/273/2010- MA1(H1N1pdm09), A/Tomsk/273/2010- MA2(H1N1pdm09) and A/Tomsk/273/2010- MA3(H1N1pdm09) to evaluate the effect of antiviral drugs (variants). Prokopyeva E.A., Shestopalova L.V., Shestopalov A.M. RU 2 605 317 C1 https://yandex.ru/patents/doc/RU2605317C1_20161220.
10. Lysikov A.I., Kalinkin P.N., Sashkina K.A., Okunev A.G., Parkhomchuk E.V., RastigeevS.A., Parkhomchuk V.V., Kuleshov D.V., Vorobyeva E.E., Dralyuk R.I. Novel Simplified Absorption-Catalytic Method of Sample Preparation for AMS analysis designed at the Laboratory of Radiocarbon Methods of Analysis (LRMA) in Novosibirsk Akademgorodok // International Journal of Mass-spectrometry. 2018. V. 433. P. 11-18. DOI: 10.1016/j.ijms.2018.08.003.
11. Parkhomchuk V.V., Rastigeev S.A. Accelerator mass spectrometer of the center for collective use of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences // Journal of Surface Investigaion. 2011. V. 5. I. 6. P. 1068-1072. DOI: 10.1134/S1027451011110140.
12. Manual for the laboratory diagnosis and virological surveillance of influenza. WHO Global Influenza Surveillance Network, 2011. 153p.
13. Ashmarin, I.P. Statisticheskie methody v microbiologicheskich issledovaniyach [in russian] / I.P. Ashmarin, A.A. Vorobyev. - M.:, Medgiz, 1962. - 179 p.
14. Prokopyeva E.A., Parkhomchuk E.V., Sobolev I.A., Shestopalov A.M. Development of a new method for diagnosing virus-cell interaction using accelerator mass spectrometry // Modern problems of science and education. 2019. № 1. doi. 10.17513/spno.28463

В период с 1 по 2 марта 2022 года в г. Екатеринбурге состоялась V Всероссийская научно-практическая конференция «Биосферная совместимость атомной энергетики-2022», организатором которой является Институт промышленной экологии УрО РАН. Конференция, которая проводится каждые два года, уже традиционно объединяет ведущих специалистов атомной отрасли, научных сотрудников университетов и академических институтов.

В рамках конференции 2022 года директором Физико-технического института Уральского федерального университета В. Ю. Ивановым, директором Института промышленной экологии УрО РАН И. В. Ярмошенко и первым заместителем генерального директора Уранового холдинга «АРМЗ» А. И. Шеметовым был подписан «Меморандум о проекте общественного контроля».

Всю информацию для подачи статьи в журнал «Траектория исследований – человек, природа, технологии» вы можете найти на сайте:

www.restrajectory.ru