

Минобрнауки России



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физической химии и электрохимии  
им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук  
(ИФХЭ РАН)

Ленинский проспект, д. 31, корп. 4. Москва. 119071.

Тел. (495) 955-46-01; Факс: (495) 952-53-08; E-mail: dir@phyche.ac.ru; http://www.phyche.ac.ru  
ОКПО 02699292; ОГРН 1037739294230; ИНН/КПП 7725046608/772501001

25.04.2023 № 12105-01-12/506

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Председателю Совета по приоритетному направлению  
научно-технологического развития РФ  
«Возможность эффективного ответа российского общества  
на большие вызовы с учетом взаимодействия человека и природы,  
человека и технологий, социальных институтов  
на современном этапе глобального развития,  
в том числе применяя методы гуманитарных и социальных наук» 20ж)  
Дынкину А.А.

Глубокоуважаемый Александр Александрович!

По итогам заседания Совета КНТП, состоявшегося 22 ноября 2022 года, инициатору заявки на разработку КНТП полного инновационного цикла «Разработка и внедрение в производство комплекса прорывных, безопасных для человека и природы электронно-лучевых технологий и технических средств обезвреживания отходов и аварийных техногенных выбросов» было рекомендовано доработать текст заявки в соответствии с высказанными замечаниями членов Совета.

За истекший период внесены изменения и подготовлены дополнительные материалы в части описания технико-экономического обоснования, значительно расширена фундаментальная и прикладная часть программы, связанная с экологией.

Комплексная междисциплинарная программа, включающая создание уникального оборудования (сверхмощные ускорители), комплекс мероприятий по мониторингу, прогнозированию, предотвращению экологических угроз, экономической модели оценки и предотвращения указанных угроз, подготовку кадров, исходит из императива реализации федеральной Стратегии экологической безопасности.

Прошу Вас рассмотреть на заседании Совета заявку на разработку КНТП.

С уважением,

Директор Института  
член-корреспондент РАН



А.К. Буряк

В Совет по приоритетным направлениям научно-технологического развития РФ «Возможность эффективного ответа российского общества на большие вызовы с учётом взаимодействия человека и природы, человека и технологий, социальных институтов на современном этапе глобального развития, в том числе применяя методы гуманитарных и социальных наук» (20.ж)

---

(указывается наименование совета по приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации)

### **Заявка на разработку**

Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение в производство комплекса прорывных, безопасных для человека и природы электронно-лучевых технологий и технических средств обезвреживания отходов и аварийных техногенных выбросов»

*(комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла / комплексного научно-технического проекта полного инновационного цикла (далее – комплексная программа / комплексный проект)*

ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

---

(наименование органа государственной власти, совета по приоритетным направлениям научно-технологического развития Российской Федерации, организации реального сектора экономики, общественного объединения, института развития, иной организации, являющейся инициатором комплексной программы / комплексного проекта)

### **1. Цель комплексной программы/комплексного проекта (конечные результаты, соответствующие приоритетам научно-технологического развития Российской Федерации)**

Цель комплексной программы полного инновационного цикла состоит в разработке, промышленном внедрении и организации серийного производства технических средств для реализации безопасных уникальных электронно-лучевых технологий крупнотоннажного, энергоэффективного, безреагентного обезвреживания газообразных, жидких и твердых отходов и аварийных техногенных выбросов с обеспечением радикального снижения негативной химической и биологической нагрузки на население и окружающую среду.

Программа исходит из федеральной политики, направленной на социально-экономическое развитие страны. Социальной сущностью Программы является вклад в поддержание здоровья и трудоспособности населения на максимально возможном уровне.

Реализация КНТП приведет к возможности и способности определять реальную степень экологической угрозы, а также к расширению сфер применения наукоемкой электронно-лучевой техники за счет её внедрения в водоочистную практику, приведет не только к созданию новой отрасли электронной техники экологического назначения, но также даст **комплексный** народно-хозяйственный эффект, благоприятный для здоровья людей, среды их обитания, продвижения передовых и прорывных технологий, выведет Россию в мировые лидеры в решении экологических проблем.

Актуальность создания научного комплекса для электронно-лучевых исследований экологического назначения связана с насущной необходимостью появления в стране и мире первого мощного инструмента мирового уровня для разработки, отладки и внедрения прорывных технологий на основе использования электронных пучков в экологической и природоохранной практике. Комплекс востребован для проведения междисциплинарных исследований в рамках задач Минобрнауки и Минприроды, включая задачи комплексного анализа воздействия жидких, газообразных и твердых отходов на здоровье человека,

состояние окружающей среды; выявления ключевых проблем; критических информационных пробелов; совершенствование нормативов очистки.

Целевые направления Программы

1. Очистка стоков (детоксикация, обесцвечивание, дезодорация, повышение биоразлагаемости, удаление тяжелых металлов, обезвреживание диоксинов, деминерализация, коагуляция, стерилизация и др.);

2. Обезвреживание дренажных стоков с полигонов твердых бытовых отходов (свалок).

3. Очистка дымовых и выбросных газов (прежде всего, очистка от двуокиси серы и окислов азота), в том числе, с получением сельскохозяйственных удобрений;

4. Переработка твердых полимерных отходов (прежде всего, сортировка пластиков, окисление и производство композитов);

5. Обезвреживание осадков сточных вод (дезинфекция, дегельминтизация, инаktivация возбудителей бруцеллеза, сальмонеллеза, пастереллеза, рожи свиней, ящура, чумы, сибирской язвы и др.), в том числе, с получением удобрений.

Все эти процессы осуществимы посредством применения электронно-лучевой обработки (далее ЭЛО) загрязненных сред и материалов. ЭЛО основано на обезвреживании загрязнений под действием пучков ускоренных электронов, генерируемых мощными электрофизическими устройствами – ускорителями электронов.

Соответствие Указу Президента РФ от 7 июля 2011 года № 899. Цель программы согласуется с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, утвержденных Указом Президента РФ от 7 июля 2011 года № 899: 6. «Рациональное природопользование» и 8. «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика». Программа предусматривает решение комплекса научных, производственных и организационных задач по созданию и внедрению прорывных отечественных технологических и технических средств для электронно-лучевого обезвреживания отходов в соответствии с критическими технологиями: 19. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения. 21. Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. 26. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии.

Данная цель связана с противодействием современным техногенным и биогенным угрозам, обеспечивает независимость и конкурентоспособность страны за счет создания эффективной системы наращивания и наиболее полного использования интеллектуального потенциала нации в области химии и физики высоких энергий и электронно-лучевых технологий. Программа опирается на лидерство страны по избранным направлениям научно-технологического развития в рамках как традиционных, так и новых рынков технологий.

Императив программы – экологическая безопасность человека. Современная антропогенная активность провоцирует рост негативных явлений, прежде всего, стремительное загрязнение окружающей среды отходами. В этой связи, способность страны поддерживать экологический баланс служит показателем уровня её цивилизованности. Суть программы сформирована из консолидации знаний о текущих и перспективных экологических проблемах и путях решения этих проблем передовыми физико-химическими методами.

Соответствие Указу Президента РФ от 2 июля 2021 г. № 400. Программа предусматривает осуществление полного инновационного цикла научно-исследовательских, производственных и организационных работ в соответствии с национальными интересами Российской Федерации и стратегическими национальными приоритетами, сформулированными в Указе Президента РФ от 2 июля 2021 г. № 400: «Сбережение народа России, развитие человеческого потенциала, повышение качества жизни и благосостояния граждан»; «Устойчивое развитие российской экономики на новой технологической основе»;

«Охрана окружающей среды, сохранение природных ресурсов и рациональное природопользование, адаптация к изменениям климата».

По направлению «Экологическая безопасность и рациональное природопользование» из Указа Президента РФ от 2 июля 2021 г. № 400, программа предусматривает решение задач, направленных на: уменьшение загрязнения воздуха; повышение качества воды; восстановление водных экосистем; развитие мощностей и технологий очистки выбросов и стоков; развитие международного сотрудничества; сокращение выбросов парниковых газов; развитие индустрии утилизации и рециклинга отходов; экологическая реабилитация территорий; повышение уровня экологического образования; повышение технического потенциала и оснащенности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Наряду с производственными и организационными задачами экологического и природоохранного назначения, программа предусматривает решение задач в области «Научно-технологическое развитие» из Указа Президента РФ от 2 июля 2021 г. № 400: вовлечение бизнеса в инновации; модернизация и развитие научной инфраструктуры; развитие системы подготовки молодых ученых; достижение лидирующих позиций в мировой науке; исследования по биологической, радиационной и химической безопасности;

п  
о  
д  
г

Ключевые комплексные задачи программы:

1. Разработка, создание и внедрение в научно-образовательную практику уникального научно-демонстрационного комплекса (установок, средств контроля и измерения, учебно-методических и информационных материалов) для электронно-лучевых исследований экологического назначения;
2. Разработка, производство и внедрение технологических высокомошных электронных ускорителей экологического назначения, а также материалов, регламентирующих их применение;
3. Разработка, производство и внедрение комплекса реакционного технологического оборудования и технологии для электронно-лучевого обезвреживания газообразных, жидких и твердых отходов;
4. Разработка, производство и внедрение мобильного электронно-лучевого модуля и технологии его использования для ликвидации аварийных и чрезвычайных загрязнений.
5. Разработка и внедрение комплексной методологии эко-мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, оценки экотоксикологических параметров, мутагенной активности, структуры микробного сообщества, распространения генов антибиотикорезистентности, предотвращения и ликвидации ее загрязнения; предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

ч Решение каждой из задач будет сопровождаться детальным экологическим анализом, разработкой программ обучения и подготовки кадров для электронно-лучевых технологий, популяризацией применения электронно-лучевых технологий в промышленной экологии и природоохранной практике, координационными мероприятиями с международными агентствами (ООН) и партнерами.

Выполнение программы основывается на глубоком экологическом анализе и должно привести к разработке, изготовлению и внедрению уникальной технологии и технических средств крупнотоннажного, энергоэффективного, безреагентного обезвреживания газообразных, жидких и твердых отходов и аварийных техногенных выбросов.

Конечные результаты программы:

г  
и  
ч

1. Создание **уникального научного комплекса** для электронно-лучевых исследований экологического назначения мирового уровня.
2. Создание **уникальных сверхмощных ускорителей** экологического назначения 2-х инновационных типов.
3. Создание нового технологического подпучкового оборудования.
4. Мобильный электронно-лучевой модуль и технология его использования для ликвидации аварийных и чрезвычайных загрязнений.
5. Разработка **стандартизированной методологии оценки** экологической угрозы

## **2. Обоснование актуальности комплексной программы/комплексного проекта (важность реализации комплексной программы, комплексного проекта для достижения результатов, указанных в пункте 1 настоящей заявки)**

Настоящая программа отвечает на большие вызовы, обусловленные возрастанием антропогенных нагрузок на окружающую среду до масштабов, угрожающих воспроизводству природных ресурсов, и ростом рисков для жизни и здоровья граждан. Актуальность программы также напрямую вытекает из качественного изменения характера глобальных и локальных энергетических систем, роста значимости энерговооруженности экономики и наращивания объема выработки и сохранения энергии, ее передачи и использования. Разрабатываемые технологии и производства, основанные на электронно-лучевой обработке, безопасны для человека и природы; более того они широко используются для стерилизации медицинской продукции (международный стандарт ISO 11137-1:2006; межгосударственный стандарт ГОСТ ISO 11137-1-2011 «Стерилизация медицинской продукции») и пищевых продуктов (международный стандарт ISO 11137-1:2006; межгосударственный стандарт ГОСТ ISO 14470-2014 «Радиационная обработка пищевых продуктов»). Безопасность электронно-лучевых технологий регламентируется санитарными правилами и нормами СанПиН 2.6.1.2573-10 "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ" и действующими Нормами Радиационной Безопасности.

### Социально-экономическая значимость мероприятий по Программе

В условиях интенсификации антропогенной деятельности, проблема улучшения экологической обстановки приобретает глобальный характер. Ухудшение экологии становится реальным тормозом для роста валового национального продукта и эффективности инвестиций. Все большую часть ресурсов приходится тратить на спасение окружающей среды в ущерб развитию производства, инфраструктуры и социальной сферы. Постепенно приходит осознание необходимости находить рациональное соотношение экологических интересов общества с его экономическими интересами (удовлетворение материальных потребностей людей). Концепция устойчивого развития предполагает удовлетворение текущих потребностей без вреда для будущих поколений.

Теперь ни у кого нет сомнения, что экология тесно связана с экономикой, бизнесом, политикой, геополитикой, наукой, обороной и с государственным устройством в целом. Сейчас термин «экология» включает совокупность научных знаний, принципов мировоззрения и социально-экономической технологии устойчивого развития общества. В основе противоречия между экономическим и экологическим развитием лежит, с одной стороны, стремление к масштабному росту экономики и, с другой стороны, стремление избежать пагубных последствий этого роста для окружающей среды.

Современная несбалансированность экологии и экономики приближает критическую ситуацию - на 30% сократилась численность диких животных и птиц (за последние 40 лет), в четыре раза уменьшилось количество живых организмов в морях и океанах (за 20 лет), ежегодно исчезает около 11 млн. га лесов (в 10 раз больше, чем темпы лесовосстановления), ежегодно выбрасывается в атмосферу более 60 миллионов тонн углекислого газа, более 40% почв находится в состоянии эрозии, количество доступной пресной воды уменьшилось на 60%. По подсчетам мировых экспертов, на очистку воды до

требований питьевых стандартов приходится тратить почти 60 млрд. долларов на год. Экономические издержки, связанные с преждевременной смертью людей и утратой трудоспособности в результате загрязнения воздуха, составляют около 1,6 триллионов долларов США. По оценкам Всемирной Организации Здравоохранения, рост ВВП до 10 процентов возможен посредством улучшения здоровья людей, поскольку увеличение продолжительности жизни и снижение риска заболеваний от плохой экологии способствуют росту производительности труда, увеличению трудоспособного населения и снижению нагрузки на здравоохранение.

Сокращение загрязнения экосистемы – разумное долгосрочное капиталовложение, со временем приносящее экономическую выгоду. В этой связи, особое значение приобретают чистые («зеленые») технологии, такие как электронно-лучевая обработка (ЭЛО), входящая в число Передовых Окислительных Технологий (Hilles A. H., et al. *Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment*; Parsons, S., Ed.; IWA Publishing: London, 2018. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5766-1.ch003>). Расширение рынка чистых технологий приводит к снижению производственных затрат и расходов на борьбу с загрязнением. Страны с наибольшим весом чистых технологий получают неоспоримые преимущества.

Для перевода экономики России на путь устойчивого развития необходимо осуществить комплекс обязательных мер, включая совершенствование законодательства, экологических стандартов и качества мониторинга состояния окружающей среды. Более того, для России, экономика которой довольно энергозависима, особенно важно осуществлять эффективные преобразования энергетических активов в чистые технологии, гарантирующие достойные условия жизни нынешним и будущим поколениям.

Программа исходит из федеральной политики, направленной на социально-экономическое развитие страны. Социальной сущностью Программы является вклад в поддержание здоровья и трудоспособности населения на максимально возможном уровне. Социально-экономическая значимость конечных результатов реализации Программы состоит как из прямого улучшения экологической обстановки и уровня жизни населения, так и из повышения экономического потенциала регионов:

- решение экологических проблем, обусловленных токсичными веществами, обезвреживание которых традиционными методами невозможно или чрезмерно дорого;
- снижение уровня воздействия на работников вредных и опасных производственных факторов с обеспечением благоприятных условий труда и предотвращением профессиональных заболеваний и производственных травм на очистных сооружениях;
- обоснование и оптимизация системы правовых норм, формирующих стандарты безопасных и здоровых условий труда и правовых средств по обеспечению их соблюдения;
- создание новой отрасли электронной техники экологического назначения с предоставлением новых товаров и услуг;
- повышение занятости и уровня исследований в области электронно-лучевых технологий, химии и физики высоких энергий, аддитивных технологий;
- улучшение финансового положения предприятий, производящих элементы и агрегаты электронной техники, а также смежных предприятий (мультипликативный эффект);
- повышение уровня занятости населения и создание новых рабочих мест в сфере создания высоковольтной ускорительной техники и реакционного оборудования.
- развитие конкуренции в сфере природоохранных технологий с расширением потребительского выбора;
- развитие малого вспомогательного бизнеса для повышения уровня устойчивого развития территории;
- расширение налогооблагаемой базы бюджета в местах производства и использования ускорительной и реакционной техники;

По мере роста производства, косвенные социально-экономические эффекты ожидаются в смежных отраслях, прежде всего, в машиностроении, металлургии, транспорте. Выполнение

Программа обусловит строительство новых предприятий и модернизацию уже существующих, повысит региональную деловую активность. Программой планируется максимально возможное привлечение российских производителей и поставщиков основного технологического оборудования и технологий.

Социально-экономическое развитие находится в прямой зависимости от контроля его влияния на защищенность населения от негативного влияния местных суперэкотоксикантов (СЭ), в частности, диоксинов (полигалогенированные производные бензола и фурана). Особенность многих СЭ состоит в их способности к аккумуляции в живых организмах и окружающих материалах. Эта особенность провоцирует формирование и развитие длительных, хронических, токсических процессов в организмах, подвергаемых даже малым субтоксичным дозам СЭ. Опасность представляют отдаленные последствия хронического контакта с СЭ. Однако стратегия контроля и нормативы учета отдаленных последствий в поколениях населения отсутствуют. В этой связи, программа предусматривает скорейшую разработку направлений совершенствования системы охраны здоровья населения на территориях, где имеет место или предполагается накопление СЭ. Эта работа включает изучение общих механизмов, закономерностей и особенностей формирования, развития и течения патологий, обусловленных СЭ; разработку основ и методической базы для совершенствования системы контроля и охраны окружающей среды и здоровья населения в очагах и зонах накопленного экологического ущерба; создание аналитической базы для развертывания прикладных исследований в области сбережения здоровья населения на территориях, загрязненных СЭ. Наиболее пристального внимания заслуживают территории в окрестностях свалок, промышленных источников диоксинов, на загрязняемых сточными водами территориях, в крупных промышленных центрах и моногородах с существующей или существовавшей химической промышленностью, на территориях мегаполисов.

Выполнение программы направлено на обоснование новых экологических и природоохранных нормативов, опирающихся на развернутый анализ экологической ситуации на объектах отечественной инфраструктуры. Анализ обращения с отходами призван выявить ключевые текущие и ожидаемые экологические проблемы, связанные с использованием устаревших технологий, а также предложить пути их преодоления. Важнейшей составной частью государственной экологической политики является «экологическое» образование населения и, в первую очередь, госчиновников. Поэтому эффективное экологическое образование – важная составляющая предлагаемой программы.

Текущая тактика обезвреживания биологически опасных веществ антропогенного происхождения основана на широкомасштабном применении химических реагентов в условиях низкой энерговооруженности обеззараживания. Эта тактика ведет к непрерывному росту химической и биологической нагрузки на окружающую среду – накоплению и распространению избыточных реагентов и полупродуктов, а также не полностью удаленных биологических загрязнителей в воздухе, в воде и в почве. Результатом является отравленный воздух в населенных пунктах, грязная вода в водоемах и в водопроводах, громадные и зловонные свалки, рост тяжелых заболеваний у населения. Применяемые химикаты и методы всё реже и хуже справляются с обезвреживанием антропогенных загрязнений, в первую очередь, из-за низкой химической активности по сравнению с самими загрязнениями.

Использование ускорителя для очистки воды должно приводить к уничтожению микроорганизмов и бактериофагов, деструкции внеклеточной ДНК, а также к химическим преобразованиям, которые происходят в результате электронно-лучевой обработки. Такая обработка способствует получению самых сильных радикальных форм воды и кислорода. Сами по себе свободные радикалы являются активными мутагенами, однако они нестабильны и сразу после возникновения взаимодействуют с разнообразными химическими соединениями, что способствует образованию более стабильных веществ. Сравнительный анализ мутагенной активности, экотоксикологических параметров сточных вод, а также структуры микробиома и пула генов резистентности к антибиотикам до и после электронно-

лучевой обработки позволит оценить пользу и безопасность предложенной технологии для здоровья человека и окружающей среды.

#### Принципы электронно-лучевой обработки

Любая химическая реакция представляет собой перенос электрона между молекулами загрязнений и химикатов. Такой перенос может быть осуществлен с помощью окислительных или восстановительных химикатов. Однако процесс является медленным и действует лишь на часть загрязнений. При этом часть продуктов окисления или восстановления оказываются более токсичными, чем исходные загрязнения. Важнейшая тенденция в водоочистке - максимальное уменьшение дозы применяемых химикатов.

Альтернативный путь обезвреживания загрязнений состоит в прямом переносе электрона между молекулами загрязнений и окружающими молекулами воды и атмосферного кислорода. В этом случае химикаты не требуются. Перенос электронов осуществляется с помощью электронных устройств – ускорителей электронов. Электроника уже используется повсеместно для промышленных и бытовых целей. Пришло время применить электронику для обезвреживания загрязнений. Технологии обезвреживания опасных веществ с помощью ускорителей электронов получили название – электронно-лучевая обработка (далее ЭЛО). Ускоритель создает пучок электронов, способных целенаправленно передавать энергию загрязнениям в воздухе, в воде или в твердом материале и, тем самым, обезвреживать эти загрязнения без ущерба для человека и окружающей среды. Электронно-лучевые технологии способны генерировать самые сильные окислительные и восстановительные частицы, что, в частности, обеспечивает необходимые условия обезвреживания вирусов – разрушение цепочки РНК и подавление жизнедеятельности, что особенно актуально в эпидемиологических ситуациях, в частности, при пандемии, спровоцированной коронавирусом.

#### Достоинства электронно-лучевой обработки

Программа предусматривает создание и применение электронно-лучевых технологий и технических средств обезвреживания загрязнений без использования химикатов или с многократно-уменьшенным расходом химикатов.

Важнейшие достоинства технических решений, реализуемых в программе:

- замена опасных и экологически-вредных методов обезвреживания загрязнений на безреагентные и экологически-безопасные;
- сокращение и устранение источников дурно-пахнущих и канцерогенных газов, ядовитых примесей в воздухе, воде и в осадках сточных вод;
- стерилизация сред, образуемых при обезвреживании загрязнений;
- сокращение площадей, занимаемых обезвреживающими сооружениями;
- сокращение площадей, занимаемых под депонирование илового осадка и мусорные полигоны;
- сокращение стадий обезвреживания загрязнений с увеличением его качества;
- устранение избыточного содержания солей и соединений тяжелых металлов в очищенной воде и осадках сточных вод;
- создание условий для самоочистки водоемов, используемых для сброса воды;
- устранение источников цвета и неприятного вкуса в воде;
- повышение уровня автоматизации и контролируемости обезвреживания загрязнений;
- устранение ультрадисперсных соединений в воде и воздухе;
- снижение коррозионной активности воды на всех стадиях водоочистки;
- обеспечение необратимости и взаимодополняемости обезвреживающих эффектов.

Эффективность очистной технологии напрямую зависит от проницаемости и химической активности загрязнений по отношению к применяемым реагентам. Многие взвешенные вещества и споровые формы болезнетворных микроорганизмов являются



непроницаемыми для активного хлора, озона и УФ-излучения. Ряд растворенных примесей (соли железа и кальция, ароматические соединения) избирательно взаимодействуют с УФ излучением и, тем самым, защищают другие примеси от разложения. Большинство насыщенных органических соединений (и функциональных групп) инертно по отношению к озону. Однако эти недостатки устраняются в случае применения ЭЛО, поскольку ускоренные электроны обладают высокой проникающей способностью по отношению к любым загрязнениям. Они вызывают ионизацию как в прозрачных, так и непрозрачных соединениях; как в растворенных, так и во взвешенных примесях; как в неживых, так и в живых загрязнениях. Мобильные радикалы, возникающие в воде под действием ЭЛО, также намного легче проникают в вещество по сравнению с крупными молекулами реагентов.

Более того, активный хлор и озон способны превращать примеси в более токсичные и даже мутагенные и канцерогенные соединения, а также в соединения с высокой коррозионной активностью или неприятным запахом. В свою очередь, озонирование ухудшает коагулируемость, флокуруемость и фильтруемость взвешенных примесей в обработанных сточных водах.

В отличие от других технологий водоочистки, ключевую роль в обезвреживании примесей при ЭЛО играют радикалы, образуемые из воды. Для них характерна трансформация токсичных групп в нетоксичную форму с одновременным увеличением степени окисления (безвредности) получаемых соединений. В свою очередь, в других технологиях прямые реакции примесных молекул с реагентами приводят к росту вероятности повышения токсичности получаемых продуктов.

Избыточные радикалы, возникающие при ЭЛО, исчезают мгновенно в реакциях друг с другом, обеспечивая отсутствие последствий и не увеличивая химическую нагрузку на очищаемую среду.

Преимущества и экономические аспекты ЭЛО доказаны тысячами работ и подробно описаны в монографиях и обзорах, в частности, в:

- Hilles, A. H.; Abu Amr, S. S.; Aziz, H. A.; Bashir, M. J. K. *Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment*; Parsons, S., Ed.; IWA Publishing: London, 2018. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5766-1.ch003>.
- Sillanpää, M.; Ncibi, M. C.; Matilainen, A. *Advanced Oxidation Processes for the Removal of Natural Organic Matter from Drinking Water Sources: A Comprehensive Review*. *J. Environ. Manage.* 2018, 208, 56–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.009>.
- O'Shea, K. E.; Dionysiou, D. D. *Advanced Oxidation Processes for Water Treatment*; Stefan, M. I., Ed.; IWA Publishing: London, 2012; Vol. 3. <https://doi.org/10.1021/jz300929x>.
- Pikaev, A. K. Mechanism of Radiation Purification of Polluted Water and Wastewater. *Water Sci. Technol.* **2001**, 44 (5), 131–138. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0269>.
- Woods, R.; Pikaev, A. *Applied Radiation Chemistry. Radiation Processing*; Wiley: NY, 1994.
- Chmielewski, A. G.; Han, B. Electron Beam Technology for Environmental Pollution Control. *Top. Curr. Chem.* **2016**, 374 (5), 68. <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0069-4>.
- Wojnárovits, L.; Takács, E. Wastewater Treatment with Ionizing Radiation. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **2017**, 311 (2), 973–981. <https://doi.org/10.1007/s10967-016-4869-3>.
- Pikaev, A. K. Current Status of the Application of Ionizing Radiation to Environmental Protection: I. Ionizing Radiation Sources, Natural and Drinking Water Purification (A Review). *High Energy Chem.* **2000**, 34 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/BF02761780>.

- Pikaev, A. K. Current Status of the Application of Ionizing Radiation to Environmental Protection: II. Wastewater and Other Liquid Wastes (A Review). *High Energy Chem.* **2000**, 34 (2), 55–73. <https://doi.org/10.1007/BF02761832>.
- Ponomarev A.V., Ershov B.G. The Green Method in Water Management: Electron Beam Treatment. // *Environmental Science and Technology*, 2020, 54, 9, 5331–5344. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00545>
- Makarov, I. E.; Ponomarev, A. V. Radiation-Induced Degradation of Organic Compounds and Radiation Technologies for Purification of Aqueous Systems. In *Ionizing Radiation Effects and Applications*; InTech, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72074>.
- Ponomarev A.V. High-speed electron-beam water treatment: A technological consideration. // *Radiation Physics and Chemistry*, том 172, с. 108812. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108812>
- Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Твердое тело и полимеры. Прикладные аспекты. – М.: Наука, 1987. – 448 с.

В этих и других работах обосновано, что внедрение выявленных достоинств ЭЛО тормозится, в первую очередь, отсутствием мощных ускорителей, соответствующих требованиям экономичного, крупномасштабного, некоммерческого применения (см. выше, п. 3).

Ранее были некоторые патенты по теме КНТП:

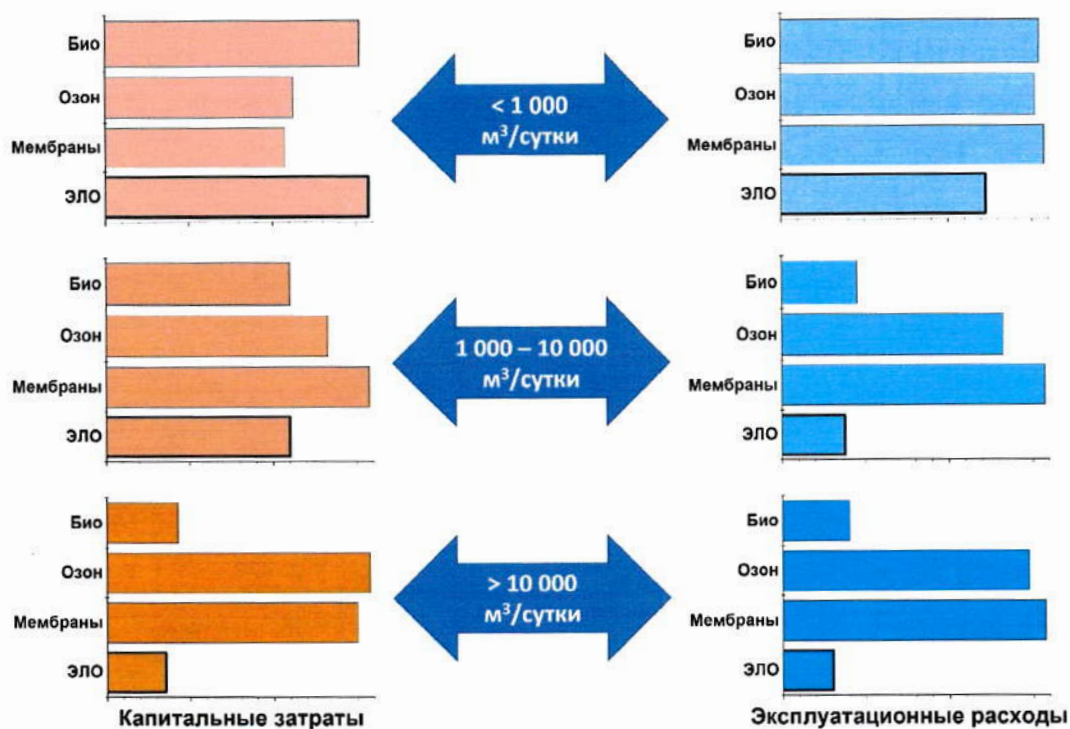
1. Пономарев А.В., Макаров И.Е., Тананаев И.Г., Мясоедов Б.Ф. Способ переработки растительного сырья. Заявка на изобретение, вх.№ 020425, рег.№ 2007118740, приоритет от 22.05.2007. (Патент РФ № 2338769, внесен в реестр 20.11.2008, опубликован в Бюллетене Изобретений № 32 за 2008 год).
2. А.В.Пономарев, А.Ю.Цивадзе, Б.Ф.Мясоедов. Способ переработки газообразных алканов. Патент РФ № 2437919 от 16.06.2010 года.
3. А.В.Пономарев, А.Ю.Цивадзе. Способ переработки углеродсодержащих газов и паров. Патент РФ № 2436760 от 23.11.2010 г.
4. Пономарев А.В., Савчук Е.И., Цивадзе А.Ю. Способ переработки липидов. Патент 2495915.
5. Пономарев А.В., Блуденко А.В., Чулков В.Н., Цивадзе А.Ю. Способ переработки липидов и полифенолов. Патент 2505580.
6. А.В.Пономарев, А.Ю.Цивадзе, Г.А.Цивадзе, В.В.Ахмедов. Способ переработки твердых органических отходов. Патент RU 2602610 С1.
7. Гафиатуллин Р.Р., Макаров И.Е., Пономарев А.В., Похило С.Б., Рыгалов В.А., Сыртланов А.Ш., Хусаинов Б.Х., Способ переработки газообразных алканов. 1997. Патент РФ на изобретение № 2099317. 20.12.1997. 7 с. (7)
8. Пономарев А.В., Макаров И.Е., Сыртланов А.Ш. Способ переработки конденсированных углеводов. 1997. Патент РФ на изобретение № 2087519. 20.12.1997. 5 с. (5)
9. Пономарев А.В., Макаров И.Е., Сыртланов А.Ш. Способ переработки конденсированных углеводов. 1997. Патент РФ на изобретение № 2099387. 20.12.1997. 5 с. (5)
10. Pikaev A.K., Makarov I.E., Ponomarev A.V., Han B., Kim Y. Removal of Cr and Hg from wastewater by electron-beam treatment. Patent of Republic Korea, 1997. 5 pp. (5)
11. Pikaev A.K., Makarov I.E., Ponomarev A.V., Han B., Kim Y. Electron-beam removal of Cr(VI) from wastewater. Patent of Republic Korea, 1997. 6 pp. (6)
12. Pikaev A.K., Makarov I.E., Ponomarev A.V., Han B., Kim J.C. Removal of Cd and Pb from wastewater by electron-beam treatment. Patent of Republic Korea, 1997. 5pp. (5)
13. Pikaev A.K., Ponomarev A.V., Bludenko A.V., Han B., Kim D.K. Ozonation of wastewater

- upon electron-beam irradiation. Patent of Republic Korea, 1997. 4 pp. (4)
14. Pikaev A.K., Ponomarev A.V., Chulkov V.N., Han B., Kim D.K., Kim S.M., Seo Y.T., Kim Y. Reactor for electron-beam treatment of large flows of wastewater. Patent of Republic Korea, 1997. 6 pp. (6)
15. А.В.Пономарев, И.Е.Макаров, С.Б.Похило. Способ очистки сточных вод. 1998 г. Патент РФ на изобретение № 2105724.
16. Duk-Kyung Kim, Bum-Soo Han, Yu-Ri Kim, Mi-Joo Kim, Joung-Hee Kim, A.K.Pikaev, A.V.Ponomarev, I.E.Makarov. Method for treating wastewater containing hazardous matter using electron beam irradiation. U.S. Patent 6,121,507. of 19.09.2000.

Данные содержатся также в разделе 8, Приложении №2, №3, №4.

#### Экономические особенности ЭЛО

Для большинства очистных технологий, увеличение мощности установки требует почти линейного увеличения производственных площадей и числа технологических агрегатов. Экономика ЭЛО отличается (см. Рис. 1). Электронно-лучевая обработка основана на высоковольтной технике. Её использование в малотоннажных случаях, т.е. на небольших предприятиях с объемом сточных вод меньше 1 000 м<sup>3</sup>/сутки, обходится относительно дорого. Капитальные затраты – одни из самых высоких. Выше, чем для биологической, мембранной и озонолитической технологий. Однако даже в этом случае, эксплуатационные расходы ниже, чем у других методов, поскольку нет потребности в реагентах, вспомогательных операциях и частом техническом обслуживании, а также нет непродуктивных потерь энергии. Экономические показатели улучшаются, когда объем сточных вод возрастает до 10 000 м<sup>3</sup>/сутки. В этом (среднетоннажном) случае ЭЛО начинает демонстрировать преимущество над другими технологиями как по капитальным затратам, так и по эксплуатационным расходам. И особую экономическую привлекательность ЭЛО приобретает при крупнотоннажном применении. Это обусловлено нелинейной зависимостью габаритов и стоимости ускорителя от мощности пучка. При одной и той же энергии пучка, площадь под ускорителем возрастает пропорционально корню четвертой степени из мощности, т.е. вертикальные ускорители мощностью 500 и 50 кВт занимают сопоставимую площадь – различия в ширине технологической площадки не превышают 1.4 раза. Таким образом, ЭЛО – технология для крупнотоннажного применения. Чем выше мощность ЭЛО установки, тем выше её рентабельность.



**Рис. 1.** Сравнительная стоимость обработки средне-загрязненного промышленного стока разными методами (при равной степени очистки) - данные МАГАТЭ (<https://www.iaea.org/>) Данные содержатся также в Приложении №2, №3, №4.

#### Технологические возможности ЭЛО и других технологий

Эффективность очистной технологии напрямую зависит от проницаемости и химической активности загрязнений по отношению к применяемым реагентам. Многие взвешенные вещества и споровые формы болезнетворных микроорганизмов являются непроницаемыми для активного хлора, озона и УФ-излучения. Ряд растворенных примесей (соли железа и кальция, ароматические соединения) избирательно взаимодействуют с УФ излучением и, тем самым, защищают другие примеси от разложения. Большинство насыщенных органических соединений (и функциональных групп) инертно по отношению к озону. Однако эти недостатки устраняются в случае применения ЭЛО, поскольку ускоренные электроны обладают высокой проникающей способностью по отношению к любым загрязнениям. Они вызывают ионизацию как в прозрачных, так и непрозрачных соединениях; как в растворенных, так и во взвешенных примесях; как в неживых, так и в живых загрязнениях. Мобильные радикалы, возникающие в воде под действием ЭЛО, также намного легче проникают в вещество по сравнению с крупными молекулами реагентов.

Более того, активный хлор и озон способны превращать примеси в более токсичные и даже мутагенные и канцерогенные соединения, а также в соединения с высокой коррозионной активностью или неприятным запахом. В свою очередь, озонирование ухудшает коагулируемость, флотуруемость и фильтруемость взвешенных примесей в обработанных сточных водах.

В отличие от других технологий водоочистки, ключевую роль в обезвреживании примесей при ЭЛО играют радикалы, образуемые из воды. Для них характерна трансформация токсичных групп в нетоксичную форму с одновременным увеличением степени окисления (безвредности) получаемых соединений. В свою очередь, в других технологиях прямые реакции примесных молекул с реагентами приводят к росту вероятности повышения токсичности получаемых продуктов.

Избыточные радикалы, возникающие при ЭЛО, исчезают мгновенно в реакциях друг с другом, обеспечивая отсутствие последствий и не увеличивая химическую нагрузку на очищаемую среду.

#### Аддитивные и интегрируемые технологии на основе ЭЛО

Электронно-лучевая обработка растворов и веществ изменяет их свойства, в том числе заряд частиц, растворимость, плавучесть, химическую стойкость, дисперсность, степень окисления, токсичность, цвет, запах, биоразлагаемость, насыщенность связей и другие. В частности, именно эти свойства играют ключевую роль в других технологиях водоочистки. Соответственно, применение ЭЛО в сочетании с многими другими технологиями дает высокий, зачастую синергетический эффект (Woods, R.; Pikaev, A. *Applied Radiation Chemistry. Radiation Processing.*; Wiley: NY, 1994). Например, электронно-индуцируемое повышение агрегации частиц благоприятно для методов коагуляции, флотации и фильтрации. Изменение полярности и заряда молекул востребовано в методах сорбции, электродиализа и коагуляции. Изменение насыщенности связей и функциональных групп способствует росту эффективности полимеризационной, озонолитической и термохимической очистки. Однако наиболее известным является сочетание ЭЛО и биологической очистки. ЭЛО улучшает степень окисления и биоразлагаемость молекул, что позволяет уменьшать время и площади, а также увеличивать качество последующей био-обработки. Например, благодаря сочетанию ЭЛО и био-обработки удалось справиться с экологической катастрофой на Воронежском заводе синтетического каучука. ЭЛО обеспечило трансформацию стойкого детергента, некаля, в биоразлагаемую форму, пригодную для последующей биохимической очистки. В частности, аналогичные эффекты были продемонстрированы на очистных сооружениях полиэфирных и целлюлозно-бумажных производств. Причем другие технологии оказались неконкурентоспособными.

#### Типичные объекты для ЭЛО

Применение ЭЛО целесообразно рассматривать в приложении к крупным очистным сооружениям. Например, типичный объем сточных вод на крупных отечественных целлюлозно-бумажных предприятиях составляет порядка 100 000 м<sup>3</sup>/сутки. Типичный бойлер ТЭС мощностью 200 МВт вырабатывает около 30 000 т/сутки дымовых газов. В свою очередь, типичный областной центр производит до 18 000 т/сутки твердых органических отходов. ЭЛО может применяться на каждом из таких объектов. При очистке сточных вод энергозатраты могут составлять от 0.5 до 3 кДж/кг. При обезвреживании дымовых газов – от 10 до 13 кДж/кг. При переработке твердых отходов (сортировка и/или производство композитов) – от 7 до 25 кДж/кг. Максимальная суммарная мощность ускорителей, требуемая для таких операций, оценивается величинами 4 300 – 6 500 кВт (при КПД = 0.8). Это соответствует примерно 40-44 типовых ускорителей, применяемых в коммерческих организациях. Естественно, столь большое число ускорителей отпугивает потенциальных потребителей ЭЛО. Однако, единичная мощность типовых ускорителей для экологических задач может быть существенно увеличена. Есть технические решения и предпосылки для замещения десятка маломощных коммерческих ускорителей на один мощный ускоритель экологического назначения, что и является одной из целей Программы.

Участники проекта являлись и являются инициаторами, координаторами и ключевыми участниками мероприятий МАГАТЭ, посвященных вопросам использования излучений в нано-технологиях, переработке полимерных отходов, синтезе мембран для энергетики, обезвреживании биологически-опасных загрязнений, а также по вопросам развития и использования высокомоощных электронных ускорителей (F23036 "Recycling of Polymer Waste for Structural and Non-Structural Materials by using Ionizing Radiation», Development of Radiation-Grafted Membranes for Cleaner and Sustainable Energy (2018-2020), Emerging Application on Advanced Materials (2018-2019), Recent Achievements on the Removal of Biohazardous Pollutants by Radiation (2019-2020), Radiation-driven Processes in Nanoscience/Nanotechnology (2017-2019),

Radiation Inactivation of Biohazards Using High Power Electron Beam Accelerators (2020), Recycling of Polymer Wastes by Radiation (2018-2021)).

Участники программы разработали базовые положения регионального (Европа и страны Индийско-Тихоокеанского региона) онлайн-курса обучения по программе RAS1014 «Переработка пластиковых отходов» (Online Regional Training Course for “Recycling of plastic waste”) и Руководящих Указаний (книга) МАГАТЭ «Guideline for integrating Electron Beam Technology into Polymer Recycling».

Члены научного коллектива, задействованного в проекте, участвовали в разработке и популяризации новых электронно-лучевых подходов к получению «востребованных продуктов при электронно-лучевой цепной деградации высокомолекулярных соединений (Патенты РФ № 2579514 и № 2619122)». Членами научного коллектива был разработан метод цепного получения реагентов, мономеров и ингибиторов полимеризации из возобновляемой биомассы (DOI: 10.1016/j.mencom.2019.09.038, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2018.07.004), обоснованы проявления синергизма в деградации растительных макромолекул (DOI: 10.1007/s10086-018-1746-4, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2017.07.007), предложены улучшения в технологии упрочнения полимерных изделий (DOI: 10.1016/j.radphyschem.2015.03.019), разработан новый способ получения моторных топлив из тяжелых и легких углеводов (DOI: 10.1016/j.radphyschem.2016.02.002, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2011.11.060, Патент РФ № 2437919, Патент РФ № 2436760).

Верификация преимуществ ЭЛТ с помощью маломощных ускорителей проведена и подробно описана, в частности, в:

- Hilles, A. H.; Abu Amr, S. S.; Aziz, H. A.; Bashir, M. J. K. *Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment*; Parsons, S., Ed.; IWA Publishing: London, 2018. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5766-1.ch003>.
- Sillanpää, M.; Ncibi, M. C.; Matilainen, A. *Advanced Oxidation Processes for the Removal of Natural Organic Matter from Drinking Water Sources: A Comprehensive Review*. *J. Environ. Manage.* 2018, 208, 56–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.009>.
- O’Shea, K. E.; Dionysiou, D. D. *Advanced Oxidation Processes for Water Treatment*; Stefan, M. I., Ed.; IWA Publishing: London, 2012; Vol. 3. <https://doi.org/10.1021/jz300929x>.
- Pikaev, A. K. Mechanism of Radiation Purification of Polluted Water and Wastewater. *Water Sci. Technol.* **2001**, 44 (5), 131–138. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0269>.
- Woods, R.; Pikaev, A. *Applied Radiation Chemistry. Radiation Processing.*; Wiley: NY, 1994.
- Chmielewski, A. G.; Han, B. Electron Beam Technology for Environmental Pollution Control. *Top. Curr. Chem.* **2016**, 374 (5), 68. <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0069-4>.
- Wojnárovits, L.; Takács, E. Wastewater Treatment with Ionizing Radiation. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **2017**, 311 (2), 973–981. <https://doi.org/10.1007/s10967-016-4869-3>.
- Pikaev, A. K. Current Status of the Application of Ionizing Radiation to Environmental Protection: I. Ionizing Radiation Sources, Natural and Drinking Water Purification (A Review). *High Energy Chem.* **2000**, 34 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/BF02761780>.
- Pikaev, A. K. Current Status of the Application of Ionizing Radiation to Environmental Protection: II. Wastewater and Other Liquid Wastes (A Review). *High Energy Chem.* **2000**, 34 (2), 55–73. <https://doi.org/10.1007/BF02761832>.
- Ponomarev A.V., Ershov B.G. The Green Method in Water Management: Electron Beam Treatment. // *Environmental Science and Technology*, 2020, 54, 9, 5331–5344. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00545>

- Makarov, I. E.; Ponomarev, A. V. Radiation-Induced Degradation of Organic Compounds and Radiation Technologies for Purification of Aqueous Systems. In *Ionizing Radiation Effects and Applications*; InTech, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72074>.
- Ponomarev A.V. High-speed electron-beam water treatment: A technological consideration. // *Radiation Physics and Chemistry*, том 172, с. 108812. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108812>
- Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Твердое тело и полимеры. Прикладные аспекты. – М.: Наука, 1987. – 448 с.

Патент RU220370С1 «Способ обеззараживания воды» и многие другие подобные патенты описывают совокупность операций, но не указывает на условия и средства практической реализации в крупнотоннажных экологических задачах.

Ранее требуемые ускорители высокой мощности не создавались и не использовались на практике. Как следствие, помимо создания ускорителей, задачи фундаментальных научных исследований направлены на выяснение особенностей взаимодействия мощных электронных пучков с веществом, на экологические показатели электронно-лучевой обработки, а также на определение условий реализации синергетических, цепных и пост-эффектов, обеспечивающих эффективность электронно-лучевой обработки отходов в промышленных масштабах.

**Однако внедрение выявленных достоинств ЭЛО тормозится, в первую очередь, отсутствием мощных ускорителей, соответствующих требованиям экономического, крупномасштабного, некоммерческого применения** (см. выше, п. 3).

Производственная часть программы связана с созданием уникальной новой ускорительной техники и реакционного оборудования высокой производительности, соответствующей текущим и перспективным задачам широкомасштабного обезвреживания отходов. В настоящей программе предполагается создать уникальные стационарные и мобильные ускорители с производительностью обезвреживания сточных вод не менее 40 тысяч м<sup>3</sup>/сутки и разработать технологии, требующие для случая жидких систем не выше 3 кГр (3 кДж/кг) энергетических затрат».

При создании ЭЛО установок, основным ценообразующим элементом является ускоритель. Затраты на все сопряженные элементы (реакционное оборудование, помещения, коммуникации, проектирование, пусконаладочные работы, накладные расходы и т.п.) прямо пропорциональны стоимости ускорителя (Козлов, Ю.Д., Путилов, А.В. *Технология использования ускорителей заряженных частиц в промышленности, медицине и сельском хозяйстве*. М. Энергоатомиздат. 1997 г. (Серия "Российские высокие технологии"); Woods, R.; Pikaev, A. *Applied Radiation Chemistry. Radiation Processing.*; Wiley: NY, 1994).

Расширение рынка чистых технологий приводит к снижению производственных затрат и расходов на борьбу с загрязнением. Страны с наибольшим весом чистых технологий получают неоспоримые преимущества.

По данным Международного Агентства по Атомной Энергии (МАГАТЭ, см. Consultants' meeting of IAEA on technical and economic evaluation of the radiation treatment of wastewater, 2000; IAEA Technical Meeting on Emerging Applications of Radiation Processing for the 21st Century, 2003), электронно-лучевое обезвреживание стоков имеет наивысшую энергетическую эффективность (энергозатраты от 0.5 кДж/кг). Вместе с тем, наивысшей экономической эффективностью обладают установки с большим объемом перерабатываемых стоков (10 тысяч м<sup>3</sup>/сутки и более). В настоящей программе предполагается создать уникальные стационарные ускорители с производительностью обезвреживания сточных вод не менее 40 тысяч м<sup>3</sup>/сутки и разработать технологии, требующие для случая жидких систем не выше 3 кГр (3 кДж/кг) энергетических затрат.

Актуальность направлений Программы

Актуальность создания уникального научного комплекса для электронно-лучевых исследований экологического назначения (Комплексная задача 1) связана с насущной необходимостью появления в стране и мире первого мощного инструмента мирового уровня для разработки, отладки и внедрения прорывных технологий на основе использования электронных пучков в экологической и природоохранной практике. Такой комплекс востребован для проведения междисциплинарных исследований в рамках задач Минобрнауки и Минприроды, включая задачи комплексного анализа воздействия жидких, газообразных и твердых отходов на здоровье человека, состояние окружающей среды; выявления ключевых проблем; критических информационных пробелов; совершенствование нормативов очистки. Фундаментом такого научного комплекса может явиться УНУ КРХИ при ИФХЭ РАН.

Актуальность создания высоковольтных ускорителей экологического назначения 2-х инновационных типов (Комплексная задача 2) связана с задачей развития мощностей и технологий очистки выбросов и стоков, и **основывается на доказанной эффективности электронно-лучевого обезвреживания загрязнений, но отсутствии на мировом рынке ускорителей промышленного типа, пригодных для крупнотоннажных экологических и природоохранных применений.** Сегодня выпускаются ускорители, ориентированные на электронно-лучевое модифицирование полимерных материалов, где не нужна высокая мощность (высокий ток) пучка. Для обработки 1 млн. тонн воды или газов в сутки (отходы среднего города) потребовалось бы более 100 таких ускорителей, что дорого и требует большой площади. К тому же, требования, предъявляемые к пучковым окнам для обработки пластиков и, например, сточной воды, не совпадают. Объемы муниципальных отходов многократно выше, чем производственные мощности отдельных предприятий. Программа предусматривает создание новых специализированных ускорителей высокой мощности (не менее 400 кВт, ток пучка не менее 0.5 мА), что в перспективе позволило бы использовать 3-5 ускорителей вместо 100. Площадь, потребная для размещения одного ускорителя слабо зависит от мощности пучка, поэтому новые ускорители заняли бы в десятки раз меньшую площадь. Поэтому для компактного и экономичного решения экологических задач мощность ускорителей должна быть не менее 400 кВт.

Технологические DC ускорители электронов, производимые в НИИЭФА

Модель	Энергия, МэВ	Мощность, кВт	Ток пучка, мА
RTE(D)-1	1.0	3	3
Electron-1-3	0.7	7-10	15
Aurora-1,2 Electron-4	0.5	25	50
Aurora -3-9	0.3-0.75	20	70
Model PA	1.0	100	100
Electron-6	1.5-2.5	60	120
Electron-7	1.0	100	100
Electron-10	0.75	50	70
Electron-23	1.0	500	500



	СТОЧНЫЕ ВОДЫ	ДЫМОВЫЕ ГАЗЫ	ТКО
Поток	100 000 т/сутки (ЦБК)	32 000 т/сутки (200 МВт бойлер)	18 000 т/сутки (М/П завод)
Энегозатраты	0.5-3 кДж/кг	10-13 кДж/кг	7-25 кДж/кг
Выход	960 – 5 760 кг/кВтч	220-290 кг/кВтч	115-410 кг/кВтч
Мощность ускорителей	722 – 4 333 кВт	5 890 – 6 100 кВт	1 820 – 6 520 кВт
Число ускорителей	44 ускорителя	41 ускоритель	44 ускорителя
Ожидаемое число ускорителей		2 - 4 ускорителя	

В КНР изготовлена установка, которая является копией установки, разработанной российскими учеными и внедренной в Южной Корее. Именно российские установки «послужили прототипами для нескольких очистных установок в Китайской Народной Республике, Индии и на Ближнем Востоке, но на базе маломощных ускорителей (до 130 кВт), предназначенных для модифицирования пластиков».

Производственная часть программы связана с созданием уникальной новой ускорительной техники и реакционного оборудования высокой производительности, соответствующей текущим и перспективным задачам широкомасштабного обезвреживания отходов. В настоящей программе предполагается создать уникальные стационарные ускорители с производительностью обезвреживания сточных вод не менее 40 тысяч м<sup>3</sup>/сутки и разработать технологии, требующие для случая жидких систем не выше 3 кГр (3 кДж/кг) энергетических затрат».

Данные содержатся также в Приложении №2, №3, №4.

Передовые тенденции развития крупнотоннажных электронно-лучевых технологий экологического назначения свидетельствуют о целесообразности изготовления: 1) установок с «мульти-пучковыми» ускорителями, когда один высоковольтный генератор питает несколько ускорительных трубок, используемых для обезвреживания нескольких параллельных потоков (1-ый тип, ИЯФ СО РАН)); 2) установок с «мульти-оконными» ускорителями, когда электронный пучок, формируемый одной ускорительной трубкой, распределяется между несколькими пучковыми окнами, используемыми для облучения одного кольцевого потока с разных направлений (2-ой тип, НИИЭФА). Эти два типа ускорителей различаются габаритами и пространственным распределением энергии в реакционном оборудовании и, соответственно, определяют разные требования к конструкции реакционного подпучкового оборудования. Необходимость в двух типах ускорителей определяется разными типами отходов, их разным объемом, составом и степенью загрязненности, разными требованиями к конечному результату и разными типовыми условиями размещения на технологических площадках.

Актуальность создания реакционного технологического оборудования для электронно-лучевой обработки (Комплексная задача 3) обусловлена задачами развития индустрии утилизации и рециклинга отходов, а также развития мощностей и технологий очистки выбросов и стоков. Отсутствие мощных ускорителей для крупнотоннажных экологических и природоохранных задач влечет за собой пробелы в создании реакционного технологического оборудования, пригодного для работы в связке с такими ускорителями. Реакционные сосуды должны соответствовать геометрии и энергетическим характеристикам электронного пучка и, соответственно, их создание напрямую зависит от создания мощных ускорителей.

Актуальность создания мобильного электронно-лучевого модуля для ликвидации аварийных и чрезвычайных загрязнений (Комплексная задача 4) связана с насущной задачей повышения технического потенциала и оснащенности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Эффективность ликвидации таких последствий напрямую зависит от оперативности доставки соответствующих средств к

месту чрезвычайных ситуаций. Мобильный электронно-лучевой модуль представляет собой компактный электронный ускоритель в комплексе с реакционным оборудованием и системами управления. Такой модуль может размещаться на базе типовых грузовых средств автомобильного, железнодорожного, водного или авиационного транспорта, обеспечивающих мобильность.

Решение каждой комплексной задачи будет сопровождаться анализом сопряженных экологических проблем – выявлением степени угрозы здоровью населения, длительно находящегося или проживающего в условиях воздействия загрязнений на территориях, прилегающих к очистным сооружениям, промышленным и сельскохозяйственным предприятиям (Комплексная задача 5). Такие источники провоцируют возникновение токсических эффектов, провоцирование вирусных инфекций и, как следствие, общее иммунодепрессивное действие на человека. Решение экологической проблемы особенно актуально в эпидемиологических ситуациях, в частности, в условиях распространения новой коронавирусной инфекции. Также решение каждой из задач будет сопровождаться разработкой программ обучения и подготовки кадров для электронно-лучевых технологий, популяризацией применения электронно-лучевых технологий в промышленной экологии и природоохранной практике, координационными мероприятиями с международными агентствами (ООН) и партнерами.

Наряду с экологическим продвижением, реализация комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла в области ЭЛО даст долгожданный импульс развитию передовой высоковольтной техники, генерирующей и использующей электронные пучки. Наряду с экологией, такая техника востребована в производстве и модифицировании инновационных полимерных и композиционных материалов, включая автомобильные шины, провода и кабели, термостойкие и износостойкие покрытия, дорожные покрытия, строительные материалы и многое другое. Сегодня за рубежом пока не удастся создать мощные ускорители, пригодные для экологического применения, однако отечественные специалисты обладают инновационными передовыми образцами мощной ускорительной техники, отвечающей масштабным экологическим и промышленным задачам.

Текущая тактика обезвреживания биологически опасных веществ антропогенного происхождения основана на широкомасштабном применении химических реагентов в условиях низкой энерговооруженности обеззараживания. Эта тактика ведет к непрерывному росту химической и биохимической нагрузки на окружающую среду – накоплению и распространению избыточных реагентов и полупродуктов в воздухе, в воде и в почве. Результатом является отравленный воздух в населенных пунктах, грязная вода в водоемах и в водопроводах, громадные и зловонные свалки, рост тяжелых заболеваний у населения. Применяемые химикаты и методы всё реже и хуже справляются с обезвреживанием антропогенных загрязнений, в первую очередь, из-за низкой химической активности по сравнению с самими загрязнениями.

Выполнение программы направлено на обоснование новых экологических и природоохранных нормативов, опирающихся на развернутый анализ экологической ситуации на объектах отечественной инфраструктуры. Анализ обращения с отходами призван выявить ключевые текущие и ожидаемые экологические проблемы, связанные с использованием устаревших технологий, а также предложить пути их преодоления.

Фундаментальная и прикладная часть Программы, связанная с экологией, заключается в проведении исследовательских работ, консолидирующих четыре направления (**Приложение №1**), итогом которого должна стать разработка **стандартизированной методологии определения экологической угрозы**. Комплексный подход, реализуемый в данных исследованиях, позволит определять реальную степень экологической угрозы, дать наиболее полную и глубокую оценку влияния загрязнений на здоровье человека, состояние окружающей среды.

(1)

Проблема генетической безопасности человека приобретает все большую актуальность в связи с появлением новых факторов риска, способных повреждать генетический материал соматических и половых клеток, и индуцирующих развитие онкологических, наследственных и других заболеваний. К числу таких факторов относят, разнообразные химические и физические агенты окружающей среды, ионы тяжёлых металлов, новые лекарственные препараты, пищевые добавки, компоненты косметических средств и средств бытовой химии, а также эндогенные факторы, такие как продукты метаболизма и активные формы кислорода. Одним из опасных накопителей патогенных микроорганизмов и мутагенных веществ являются сточные воды. Для своевременного предотвращения возможного негативного влияния химических веществ на генетический аппарат клеток человека необходимо разрабатывать и применять новые технологии, позволяющие устранять опасные патогены и проводить анализ их генетической активности. С этой целью были разработаны и применяются батареи тестов, позволяющие выявлять мутагены и канцерогены. В России обязательному тестированию на мутагенную активность подлежат новые оригинальные фармакологические средства, созданные химическими, биотехнологическими, генноинженерными и иными способами. Эта работа предусматривает оценку способности лекарственных средств к индукции разных типов мутаций с помощью комплекса методов на разных тест-объектах. Чаще всего на стадии доклинических испытаний применяют следующие тесты: тест Эймса, учет аберраций хромосом в клетках костного мозга млекопитающих, учет микроядер в клетках млекопитающих, учет рецессивных, сцепленных с полом, летальных мутаций у дрозофилы и учет соматической рекомбинации (мозаицизма) у дрозофилы. Перед второй фазой клинических испытаний проводят изучение способности лекарственного препарата индуцировать мутации в зародышевых клетках мышей (тест на доминантные летали).

В представленном проекте планируется оценить эффект электронно-лучевой обработки на уровень мутагенной активности сточных вод. Использование ускорителя для очистки воды должно приводить к уничтожению микроорганизмов и снижению мутагенной активности химических соединений. Электронно-лучевая обработка способствует получению свободных радикалов. Сами по себе свободные радикалы являются активными мутагенами, однако они нестабильны и сразу после возникновения взаимодействуют с разнообразными химическими соединениями, что способствует образованию более стабильных веществ. Сравнительный анализ мутагенной активности сточных вод до и после электронно-лучевой обработки позволит оценить эффективность и безопасность предложенной технологии для здоровья человека. В качестве негативного контроля в работе будут использованы образцы чистой дистиллированной воды, а в качестве позитивного контроля образцы дистиллированной воды с добавлением эталонных мутагенов.

Планируется использовать два подхода – тест Эймса и «Альфа-тест» разработанный и успешно апробированный на кафедре генетики и биотехнологии СПбГУ.

Тест Эймса входит в стандартную линейку тестов одобренных ГОСТ, используемых для оценки мутагенной активности лекарственных веществ. Он позволяет сравнительно быстро проанализировать большое число образцов. Сущность метода заключается в регистрации способности испытуемого соединения или его метаболитов индуцировать у индикаторных штаммов бактерий *Salmonella typhimurium*, ауксотрофных по гистидину, реверсии к прототрофности (Goyal et al., 2022. Environ Sci Pollut Res., doi.org/10.1007/s11356-021-15442-9). Штаммы бактерий, используемые в тесте Эймса, несут различные типы точечных мутаций - замены оснований или мутации сдвига рамки считывания. Возвратные точечные мутации, возникающие под действием мутагенов, обеспечивают способность клонов расти на среде без гистидина. В данном тесте появляется возможность не только выявлять мутагенность исследуемых веществ, но и изучать механизм их мутагенного действия. Ещё одной особенностью теста Эймса является возможность использования

предварительной метаболической активации тестируемого соединения путем его обработки экстрактом из печени крыс. Препараты микросом печени содержат ферменты (цитохромы P450), которые способны превращать некоторые потенциально мутагенные вещества (промутагены) в мутагены (Ames et al., 1973; Maron and Ames, 1982). Вместе с тем тест Эймса имеет ограничения – в этом тесте детектируются лишь точечные мутации, тогда как события, приводящие к хромосомным перестройкам, не регистрируются.

В лаборатории Физиологической генетики СПбГУ под руководством академика С.Г. Инге-Вечтомова разработан уникальный тест, позволяющий детектировать как точечные мутации так и любые типы хромосомных перестроек в клетках дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* (Inge-Vechtomov et al., Genome. 1989; doi.org/10.1139/g89-097; Stepchenkova et al., Genetics, 2021; doi.org/10.1093/genetics/iyab060). Более того, уникальность данной тест системы заключается в том, что Альфа-тест позволяет учитывать даже предмутационные изменения последовательности ДНК, которые в ходе клеточного цикла могут быть исправлены системой репарации. В качестве модельного объекта в предлагаемом тесте используют два штамма дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, имеющих тип спаривания альфа, поэтому тест получил название – альфа-тест. Гаплоидные штаммы дрожжей могут иметь один из двух типов спаривания «а» или «альфа». В норме возможна гибридизация клеток только противоположных типов спаривания а и альфа, при этом образуются диплоидные гибриды, не способные к дальнейшему скрещиванию. В редких случаях с частотой  $10^{-5}$  возможна гибридизация клеток одинакового типа спаривания, которая возрастает при воздействии генотоксических факторов. Такая гибридизация возможна, если одна из клеток изменила тип спаривания с альфа на а. Именно изменение частоты переключения типа спаривания дрожжевых клеток с альфа на а является показателем генетической нестабильности в альфа-тесте. Каждое событие переключения типа спаривания может быть учтено по росту клонов на селективной среде. В альфа-тесте используют два различных штамма одинакового (альфа) типа спаривания смешивают на селективной среде, на которой могут расти только «незаконные» гибриды, но не родительские штаммы. Один из гаплоидных штаммов предварительно обрабатывают потенциальным мутагеном. Такая «незаконная» гибридизация возможна, когда одна из копулирующих клеток временно или необратимо меняет свой тип спаривания с альфа на а. Незаконное переключение типа спаривания может быть вызвано различными нарушениями, затрагивающими локус типа спаривания *MATa*, который находится в правом плече хромосомы III: точечными мутациями, потерей правого плеча хромосомы III, потерей всей хромосомы III, а также рекомбинационными событиями. Предмутационные изменения, которые вызывают лишь временное нарушение экспрессии локуса *MATa* до их исправления системой репарации, также приводят к незаконной гибридизации и могут быть учтены в данном тесте.

Таким образом, использование Альфа-теста позволяет детектировать все типы предмутационных и мутационных событий в эукариотических клетках.

План работы по оценке эффекта электронно-лучевой обработки на уровень мутагенной активности сточных вод с помощью теста Эймса включает следующее:

К клеткам бактерий *Salmonella typhimurium* будет предварительно добавлен коммерчески доступный экстракт печени для активации мутагенов.

Клетки *Salmonella typhimurium* будут высеваться на чашки с твердой средой без гистидина. В верхний агар будет добавлена 1/10 объема а) сточной воды после электронно-лучевой обработки; б) сточной воды до электронно-лучевой обработки; в) чистой воды (негативный контроль); г) чистой воды с добавлением эталонного мутагена метилметан сульфата (позитивный контроль).

Образцы сточной воды до и после электронно-лучевой обработки будут добавлены в питательную среду для культивирования штаммов *Salmonella typhimurium*. К клеткам бактерий будет предварительно добавлен коммерчески доступный экстракт печени.

Для каждого варианта экспериментальных условий, а также контрольных вариантов будет использовано три повторности. Затем будет подсчитано количество выросших колоний ревертантов на каждой чашке Петри. Будут определены среднее количество колоний ревертантов и стандартная ошибка среднего для каждого варианта экспериментальных условий и определена статистическая значимость отличий. По результатам статистической обработки результатов будут сделаны выводы о мутагенной активности исследуемых проб.

Оценка эффекта электронно-лучевой обработки на уровень мутагенной активности сточных вод с помощью Альфа теста включает:

1. В работе будут использованы два штамма дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* альфа типа спаривания, несущие комплементарные генетические маркеры для отбора гибридов и генетические маркеры хромосомы III. Клетки одного из штаммов будут предварительно выращиваться в жидкой среде, содержащей один из образцов воды: (а) сточной воды после электронно-лучевой обработки; б) сточной воды до электронно-лучевой обработки; в) чистой воды (негативный контроль); г) чистой воды с добавлением мутагена метилметан сульфаната (позитивный контроль). Клетки второго штамма будут выращиваться в жидкой среде, содержащей чистую воду. 2. Клетки обоих штаммов будут высеваться совместно на селективную среду, на которой могут расти только гибриды, возникшие в результате незаконной гибридизации. 3. Во всех образцах будет подсчитано количество выросших колоний. Для каждого варианта эксперимента будет использовано не менее шести повторностей, будут определены медиана и доверительный интервал. С использованием непараметрического критерия Манна-Уитни будет определена статистическая значимость отличий. По результатам статистической обработки результатов будут сделаны выводы о мутагенной активности исследуемых проб.

Результаты, полученные в тесте Эймса и в Альфа-тесте позволят оценить влияние электронно-лучевой обработки на уровень мутагенной активности сточных вод. Оценка эффекта электронно-лучевой обработки на уровень мутагенной активности сточных вод будет проводиться на всех этапах испытания опытных и промышленных образцов. Разработка рекомендаций по оценке мутагенной активности сточных вод после электронно-лучевой обработки займёт 1 год на завершающем этапе исследования.

## (2)

Устойчивость к противомикробным препаратам является серьёзной проблемой общественного здравоохранения во всём мире. Широкое и всё более растущее использование антибиотиков и других противомикробных препаратов в медицине, ветеринарии, животноводстве, растениеводстве и в быту увеличило разнообразие и распространение антибиотикорезистентных бактерий (АРБ) и генов резистентности к антибиотикам (АРГ). Риски для здравоохранения значительно возрастают, когда бактерии приобретают множественную устойчивость к антибиотикам, что делает лечение таких инфекций особенно затруднительным.

В настоящее время АРГ считаются новым классом загрязнителей окружающей среды. Загрязнение антропогенными отходами рассматривается в качестве основного фактора, способствующего распространению АРГ. Муниципальные очистные сооружения сточных вод (ОС) являются одним из наиболее важных источников поступления АРГ в окружающую среду. Одновременное присутствие на ОС АРБ, остаточных количеств антибиотиков, других поллютантов и селективных факторов, богатого запаса питательных веществ и возможность тесного межклеточного взаимодействия способствуют горизонтальному переносу генов (ГПГ) резистентности к антибиотикам. Органические поллютанты и тяжелые металлы в значительных количествах присутствуют в сточных водах и являются факторами, усиливающими ГПГ, а следовательно, и распространение АРГ в микробных сообществах.

Для оценки биологической эффективности и экологической безопасности электронно-лучевой обработки сточных вод необходимо провести сравнительный анализ структуры микробного сообщества, количества и состава генов антибиотикорезистентности (резистома) микробиома сточных вод до и после очистки с использованием ЭЛО. Кроме того, для оценки эффективности очистки, эти же параметры должны быть определены в стоках, очищенных с помощью применяемого в настоящее время метода.

**Для оценки биологической эффективности очистки сточных вод** планируется провести анализ изменения таксономического состава микробного сообщества на основе метабаркодирования – секвенирования ампликонов переменных участков генов 16S рибосомальной РНК. Полученный массив данных секвенирования, при сравнении полученных последовательностей с содержащимися в генетической базе данных GenBank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>), позволит определить качественный и количественный таксономический состав бактерий и архей исследуемого микробиома. При анализе таксономической структуры микробиома на уровне рода можно идентифицировать присутствие в пробах санитарно-значимых патогенных/условно патогенных микроорганизмов.

Определение всей совокупности генов резистентности к антибиотикам (резистома) микроорганизмов в исследуемых образцах планируется осуществить при помощи полного высокопроизводительного метагеномного секвенирования (шот-ган). Гены антибиотикорезистентности также будут определены путем поиска гомологичных последовательностей в базе GenBank. После определения состава резистома сточных вод будут отобраны АРГ, наиболее значимые с клинической точки зрения. Текущий качественный и количественный контроль присутствия выбранных АРГ планируется проводить при помощи ПЦР в реальном времени.

**Для оценки токсичности сточных вод** планируется использовать биотестирование с применением цельноклеточных бактериальных люминесцентных сенсоров. У биолюминесцентных бактериальных сенсоров в качестве репортеров используются гены бактериальных люцифераз.

Для тестирования химических примесей (токсикантов) в воде, почве, пищевых продуктах, воздухе и др. биотесты на основе биолюминесцентных бактерий в настоящее время используются в двух вариантах:

- 1) основанном на тушении биолюминесценции токсикантом - это системы с конститутивной экспрессией;
- 2) основанном на индукции (усилении) интенсивности биолюминесценции токсикантом - системы с индуцируемой экспрессией.

*Бактерии первой группы с конститутивной экспрессией* обычно имеют высокую степень экспрессии люминесценции, которая уменьшается в токсических условиях («lights off»). Обычно это природные биолюминесцентные бактерии, такие как *Aliivibrio fischeri*. Их ответ не специфичен, то есть они реагируют на комплекс всех присутствующих токсичных веществ. В работе таких биосенсоров задействован механизм ингибирующего действия ядовитых веществ на метаболизм клетки, в основном, на дыхательную цепь, что опосредованно влияет на люциферазную реакцию, вызывая ослабление интенсивности биолюминесценции суспензии клеток

*Специфические индуцируемые тест-системы*, напротив, имеют низкий уровень базовой люминесценции, которая увеличивается после контакта с конкретным соединением и дают оптимальный ответ на соединения, представляющие интерес. В этой группе методик, основанных на индукции биолюминесценции клеток при воздействии токсиканта, используются различные варианты специфических регуляторных элементов, которые были выработаны бактериями в процессе эволюции. Эти биосенсоры с высокой степенью специфичности реагируют на наличие в среде того или другого химического вещества и

характеризуются высокой чувствительностью. Это обеспечивается особенностью взаимодействия белка-рецептора (репрессора) с химическим соединением. В результате их использования появляется возможность более детально оценить механизм действия токсического агента на клетку и определить молекулярную мишень в клетке, которую повреждает токсикант.

Кроме интегральной токсичности стоков, наличия веществ, повреждающих белки и мембраны, определяются вещества, вызывающие окислительный стресс (супероксидный и пероксидный), что реализуется с помощью биосенсоров.

В зависимости от используемых промоторов, «lights on»- биорепортеры можно разделить на эффект- и вещество-специфичные штаммы (или же широко- и узко-специфичные). Первые реагируют на определенный тип токсичности, например, на повреждение ДНК; окислительный стресс; или повреждения белков (тепловой шок), мембран. Второй тип штаммов обнаруживает одно соединение или группу соединений со схожими химическими характеристиками или образом действий, такие как металлы, алканы, бензол, толуол, этилбензол, ксилол и др.

Лаборатория экологии и молекулярной биологии микроорганизмов Академии Биологии и Биотехнологии ЮФУ имеет значительный задел в исследовании распространения генов антибиотикорезистентности в природных экосистемах и сточных водах под влиянием поллютантов, исследовании структуры микробных сообществ и экотоксикологической оценки сред при помощи цельноклеточных бактериальных lux-биосенсоров:

1. Sazykina M., Barabashin T., Konstantinova E., Al-Rammahi A.A.K., Pavlenko L., Khmelevtsova L., Karchava Sh., Klimova M., Mkhitaryan I., Khammami M., Sazykin I., Non-corresponding contaminants in marine surface sediments as a factor of ARGs spread in the Sea of Azov, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 184, 2022, 114196, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114196>.
2. Azhogina T, Sazykina M, Konstantinova E, Khmelevtsova L, Minkina T, Antonenko E, Sushkova S, Khammami M, Mandzhieva S, Sazykin I. Bioaccessible PAH influence on distribution of antibiotic resistance genes and soil toxicity of different types of land use // *Environ Sci Pollut Res.* - 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23028-2>
3. Khmelevtsova L.E., Sazykin I.S., Azhogina T.N., Sazykina M.A. Influence of Agricultural Practices on Bacterial Community of Cultivated Soils. *Agriculture*. 2022; 12(3):371. <https://doi.org/10.3390/agriculture12030371>
4. Sazykina M.A., Minkina T.M., Konstantinova E.Yu., Khmelevtsova L.E., Azhogina T.N., Antonenko E.M., Karchava Sh.K., Klimova M.V., Sushkova S.N., Polienko E.A., Birukova O.A., Mandzhieva S.S., Kudееvskaya E.M., Khammami M.I., Rakin A.V., Sazykin I.S. Pollution impact on microbial communities composition in natural and anthropogenically modified soils of Southern Russia // *Microbiological Research.* - 2022, Vol. 254, 126913, ISSN 0944-5013, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126913>.
5. Sazykin I.S., Minkina T.M., Khmelevtsova L.E., Antonenko E.M., Azhogina T.N., Dudnikova T.S., Sushkova S.N., Klimova M.V., Karchava Sh.K., Seliverstova E.Yu., Kudееvskaya E.M., Konstantinova E.Yu., Khammami M.I., Gnennaya N.V., Al-Rammahi A.A.K., Rakin A.V., Sazykina M.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons, antibiotic resistance genes, toxicity in the exposed to anthropogenic pressure soils of the Southern Russia // *Environmental Research*. 2021, Vol. 194, 110715. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110715>
6. Сазыкин И.С., Хмелевцова Л.Е., Селиверстова Е.Ю., Сазыкина М.А. Влияние использования антибиотиков в животноводстве на распространение лекарственной устойчивости бактерий // *Прикладная биохимия и микробиология.* - 2021. - Т. 57. - № 1. – С. 24-35. - DOI: 10.31857/S0555109921010335  
Sazykin I.S., Khmelevtsova L.E., Azhogina T.N., Sazykina M.A. Influence of antibiotics use in animal breeding on dissemination of bacterial drug resistance // *Appl. Biochem. Microbiol.* – 2021. - <https://doi.org/10.1134/S0003683821010166>

7. Сазыкин И.С., Ажогина Т.Н., Хмелевцова Л.Е. Хаммами М.И., Сазыкина М.А. Роль очистных сооружений сточных вод в распространении генов резистентности к антибиотикам // Теоретическая и прикладная экология. – 2020. – № 4. – С. 250-257. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-250-257  
Sazykin I.S., Azhogina T.N., Khmelevtsova L.E., Khammami M.I., Sazykina M.A. Role of wastewater treatment plants in distribution of antibiotic resistance genes// Theoretical and Applied Ecology. 2020. - V. 4. – P. 250-257. - doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-250-257
8. Khmelevtsova L.E., Sazykin I.S., Azhogina T.N., Sazykina M.A. The dissemination of antibiotic resistance in various environmental objects (Russia). // Environmental Science and Pollution Research - 2020. - 27(35). - P. 43569-43581. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10231-2>
9. Сазыкин И.С., Селиверстова Е.Ю., Хмелевцова Л.Е., Ажогина Т.Н., Кудеевская Е.М., Хаммами М.И., Гненная Н.В., Аль-Раммахи А.А.К., Ракин А.В., Сазыкина М.А. Гены устойчивости к антибиотикам в сточных водах г. Ростова-на-Дону и нижнем течении р. Дон // Теоретическая и прикладная экология. – 2019. – Т. 4. – С. 66-72.  
Sazykin I.S., Seliverstova E.Yu., Khmelevtsova L.E., Azhogina T.N., Kudееvskaya E.M., Khammami M.I., Gnennaya N.V., Al-Rammahi A.A.K., Rakin A.V., Sazykina M.A. Occurrence of antibiotic resistance genes in sewages of Rostov-on-Don and lower Don River // Theoretical and Applied Ecology. 2019. V. 4. – P. 76-82. doi:10.25750/1995-4301-2019-4-076-082
10. Gorovtsov A.V., Sazykin I.S., Sazykina M.A. The influence of heavy metals, polyaromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls pollution on the development of antibiotic resistance in soils // Environmental Science and Pollution Research. 2018. V. 25 (10). P. 9283–9292 <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1465-9>
11. Sazykin I.S., Sazykina M.A., Khmelevtsova L.E., Mirina E.A, Kudееvskaya E.M., Rogulin E.A., Rakin A.V. Biosensor-based comparison of the ecotoxicological contamination of the wastewaters of Southern Russia and Southern Germany // International Journal of Environmental Science and Technology 2016. – V. 13. - №3. - P. 945-954. - DOI 10.1007/s13762-016-0936-0.
12. Sazykin I.S., Sazykina M.A., Khammami M.I., Khmelevtsova L.E. Kostina N.V., Trubnik R.G. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of lower reaches of the Don River (Russia) and their ecotoxicologic assessment by bacterial lux-biosensors // Environmental Monitoring and Assessment. – 2015. - V. 187(5):4406. DOI:10.1007/s10661-015-4406-9
13. Сазыкина М.А., Чистяков В.А., Сазыкин И.С. Генотоксичность донных отложений р. Дон (2001-2007 гг.) // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 1. С. 92-98. IF WoS 0.27/0.415  
Sazykina M.A., Chistyakov V.A., Sazykin I.S. Genotoxicity of Don River bottom sediments (2001-2007) // Water Resources. – 2012. - V. 39. - №. - P. 118-124. DOI: 10.1134/S0097807811060169

### (3)

Современные достижения в области рационального природопользования позволяют совмещать динамичное расширение промышленных мощностей с сохранением нормального функционирования и биологического разнообразия природных или умеренно трансформированных человеческой деятельностью экосистем. Критически важным условием (и одним из критериев) рационального природопользования служит соблюдение предельных норм загрязнений (химического, термического, радиационного и др.). Одним из наиболее чувствительных индикаторов превышения этих норм являются пресноводные организмы. Результатом загрязнений водоемов может быть как снижение численности и биоразнообразия биоты, так и резкое увеличение обилия инвазивных или вредоносных видов, например, токсичных микроводорослей.



Методы контроля качества воды подробно разработаны и стандартизированы (напр. ГОСТ 17.1.3.07-82), однако новые подходы к сохранению биологического разнообразия, распространение инвазивных видов, появление новых инфекций, а также разработка в последние десятилетия новых аналитических методик привело к радикальному изменению в подходах к экологическому мониторингу промышленных объектов в мире. Анализ зарубежного опыта позволяет рекомендовать к разработке и пилотному использованию **методику оценки воздействия на окружающую среду путем исследования средовой ДНК (eDNA)**. Средовая ДНК представляет собой взвешенные в воде фрагменты генетического материала организмов, постоянно или временно населяющих водоем, а также поступающего из прибрежных экосистем. Оценка состава и обилия eDNA позволяет объективно оценить общее биоразнообразие и обилие индикаторных видов. Более того, в зависимости от задач, объемов и подробности анализа, средовая ДНК дает возможность получить информацию о состоянии биоты не только водных, но и наземных экосистем в пределах водосбора исследуемого водоема. Чувствительность уже имеющихся методов анализа средовой ДНК позволяет, при наличии постоянного мониторинга, решать прикладные и фундаментальные научные задачи, далеко выходящие за пределы стандартного контроля состояния среды. Задача исследований может быть разделена на две составляющие:

1) оценка качества очищенных вод на основе анализа средовой РНК и ДНК с целью выбора наиболее оптимального режима использования ЭЛО установки для деградации средовой РНК и ДНК (бактерии, вирусы, одноклеточные паразиты);

2) оценка экотоксичности загрязненных стоками, депонированным иловым осадком, ТБО воды, воздуха, почвы и на ее основе исследование эффекта биоаккумуляции, в результате длительного нахождения человека в условиях малых субтоксичных доз, то есть, когда объем вредного вещества в окружающей среде ниже норматива, а в живом организме происходит накопление до токсичного уровня.

#### **Оценка качества очищенных вод на основе анализа средовой РНК и ДНК – нуклеиновых кислот, содержащихся в воде (eRNA/eDNA)**

Метод основан на анализе фрагментов РНК и ДНК патогенов, содержащихся в водной среде (Rey et al., 2019; Amarasiri et al., 2021). Обитающие в водоемах организмы постоянно выделяют ДНК и РНК в водную среду. Такие нуклеиновые кислоты (НК) называют средовой ДНК/РНК (environmental RNA/DNA). Длительность сохранности НК в природных водоемах определяется множеством абиотических и биотических факторов, достигая нескольких дней, недель и даже месяцев – в зависимости от сложившихся условий деградации НК в водоеме (Beng & Corlett, 2020; Zhao et al., 2021). При фильтровании воды можно получить выборку средовой ДНК/РНК, по которой можно оценить концентрацию и степень деградации нуклеиновых кислот, а также выполнить идентификацию присутствующих в пробе вирусных, бактериальных и протозойных патогенов с определением их количественной представленности применяя высокопроизводительное секвенирование методом метабаркодинга.

Оценка эффективности очистки водной среды состоит из двух этапов.

1. Экспериментальная проверка эффективности разрушения/деградации ДНК/РНК водных организмов. Производится тестирование экспериментальных (после очистки) и контрольных (без очистки) проб воды, взятых одновременно из одного источника (сточные или загрязненные воды). Пробы воды (как экспериментальной, так и контрольной) отфильтровываются через специальный фильтр, задерживающий частицы ДНК/РНК, содержащиеся в воде. После чего выделяется тотальная ДНК и тотальная РНК и производится анализ длин фрагментов НК из проб воды, подвергшихся облучению и без такового (контроль) в биоанализаторе ДНК/РНК. По типу профиля длин фрагментов можно судить об

эффективности деградации ДНК в результате обработки вод инновационным прибором. Существенное укорочение длин фрагментов будет говорить об успешной деградации молекул ДНК/РНК. Современные биоанализаторы типа Agilent TapeStation позволяют установить длины фрагментов в диапазоне 35-60000 пар нуклеотидов. Возможны также определения концентрации ДНК и РНК определенных длин фрагментов.

2. Качественно-количественный анализ РНК и ДНК в воде после очистки в инновационной установке с применением метода метабаркодинга (Rupert et al., 2019; Vilaça et al., 2020) и высокопроизводительного секвенирования. Выделенные пробы ДНК (и кДНК-последовательности, полученные от РНК-вирусов) амплифицируют с применением универсальных пар праймеров, фланкирующих баркодовые последовательности выбранных групп организмов (например, гена 16S рибосомальной РНК в случае бактерий). Из полученных ампликонов составляются ДНК-библиотеки с уникальными для каждой пробы баркодами для индивидуальной идентификации проб. После проверки качества ДНК-библиотек в биоанализаторе, успешные библиотеки секвенируются при помощи секвенаторов нового поколения типа Illumina. После получения значительного массива отсеквенированных данных при помощи биоинформационной обработки производится фильтрация данных и генетическая идентификация организмов путем сравнения полученных последовательностей баркодовых фрагментов ДНК с таковыми в глобальной базе данных GenBank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>). Метод позволяет произвести идентификацию конкретных патогенов и оценить их количественную представленность в пробах (Gomes et al., 2017; Amarisiri et al., 2021). Это позволит проверить – нет ли различий в устойчивости каких-либо групп патогенов (вирусы, бактерии, протозойные паразиты) к применяемым параметрам облучения.

Представляется методически обоснованным провести серию повторных экспериментов по воздействию на очищаемую воду при разных режимах работы прибора (токовые или иные физические характеристики), длительности экспозиции, а также проведения экспозиции в разных объемах воды и с разным уровнем загрязненности) с целью выбора наиболее оптимального режима использования ЭЛО установки для деградации средней РНК (вирусы) и ДНК (вирусы, бактерии и одноклеточные паразиты).

#### (4)

С социальной точки зрения необходимо выявить/определить степень угрозы здоровью населения, длительно находящегося/ проживающего в условиях воздействия малых субтоксичных доз, прежде всего это селитебные территории, прилегающие к очистным сооружениям, промышленным, сельскохозяйственным предприятиям, (два крупнейших очистных находятся в черте г. Москвы) в результате чего возникают эффекты хронической экотоксичности, парадоксальной токсичности, временно компенсированной патологии. Воздействие экополлютантов создает среду вирусных инфекций, вызванных общим иммуносупрессивным действием на человека.

Аналитическая база обоснования вышесказанного не сформирована. Такая аналитическая база даст возможность : (1) разработки новых нормативов, реально отражающих безопасность среды, и (2) обозначит необходимость и обоснованность разработки и внедрения новых прорывных технологий очистки, основанных на принципах Химии и Физики Высоких Энергий – принципиально новый подход в решении экологических проблем, и (3) создаст условия востребованности данных технологий в экономическом секторе.

Следует также признать, что нормативы не решают всех проблем. Контроль безопасности жизни человека должен основываться на других принципах.

Исследования в области негативного воздействия окружающей среды именно на организм человека не проводились из-за недостаточной степени разработанности эко-

токсикометрии – методические приёмы, позволяющие оценить перспективно и ретроспективно экотоксичность загрязнителей. Сложность анализа дозовых зависимостей экологических систем надорганизменного уровня (т.е. **населения**) связана с практической **нереализуемостью эксперимента** с дозируемыми нагрузками на природные биоценозы. Сбросы/выбросы (стоки ОС) реальных источников загрязнения многокомпонентны, не всегда можно выделить ведущие токсиканты. Сейчас Роспотребнадзор (главный контролирующий орган) пользуется методиками, основанными на принципе доза-эффект, что крайне недостаточно для определения опасности состоянию здоровья населения от недостаточно качественной работы очистных сооружений. Главное – накопительный эффект от загрязнений. В рамках КНТП предлагается провести исследовательские работы по биоаккумуляции.

### **Оценка экотоксичности загрязненных диоксинами почв в местах прошлого сброса сточных вод.**

Возможность образования стойких высокотоксичных канцерогенных загрязнителей в сточных водах при их хлорировании твердо доказана. Самыми опасными среди них являются полихлорированные дибензо-п-диоксины и дибензофураны (ПХДД/Ф или диоксины) [1]. Последствия опосредованного средой длительного хронического воздействия на организм малых субтоксичных доз этих веществ могут проявляться активным ростом уровня встречаемости различных форм экологозависимых заболеваний и, как следствие, снижением темпов социально-экономического развития [2, 3]. В России метод хлорирования сточных вод активно применяли до конца 80-х годов прошлого столетия, а опасность накопленных при этом канцерогенов никогда не оценивали.

Предел токсичности для диоксинов пока не определен [2-4]. Созданный и апробированный комплекс методов оценки экотоксичности загрязненных диоксинами территорий (прежде всего почв) по показателям привнесенного этими веществами риска здоровью населения основан на биомониторинге воздействия этих веществ на организм (*биомониторинг воздействия*) во взаимосвязи с возникающими при этом начальными токсическими эффектами (*биомониторинг эффектов*). Модельными объектами для биомониторинга стали мелкие млекопитающие из природных популяций (на примере рыжей полевки *Myodes glareolus*), т.к. экологические и биологические их особенности позволяют изучать и оценивать изменения причинно-следственных связей между мерами прямого действия диоксинов на организм и возникающими при этом токсическими эффектами в реальном масштабе времени в нескольких последовательных поколениях при максимально жесткой экспозиции [5, 6].

В качестве показателей прямого действия обоснованы величины концентраций токсичных для человека конгенов диоксинов (7 ПХДД и 10 ПХДФ) в тканях животных. Для оценки опасности их комбинированного и сочетанного действия обоснованы характеристики начальных токсических эффектов, отражающие запуск механизмов формирования и развития токсического процесса в условиях эмергентного взаимодействия [2, 3, 7].

Практическую ценность созданного алгоритма методов определяют перспективы решения задач по предупреждению негативного влияния диоксинов, загрязняющих среду, на человека путем наблюдения и контроля за вызываемыми этими веществами изменениями экотоксичности почв и среды обитания в целом. Дискретный характер взаимоотношений человека с экотоксикантами предполагает существенно меньшие уровни загрязнения его организма по сравнению с животными - обитателями аналогично загрязненных территорий. Поэтому результаты измерения содержания диоксинов в тканях животных и вызываемые этими веществами токсические эффекты следует рассматривать как сигнал о перспективах накопления сопоставимых уровней содержания диоксинов в тканях человека в случае очевидного бездействия.

*Методическая база биомониторинга воздействия диоксинов уже создана и апробирована (Патент №2743498). Формула изобретения - способ оценки загрязнения окружающей среды диоксинами путем биомониторинга, отличающийся тем, что в качестве*

объекта биомониторинга используют рыжую полевку летнего и зимнего сезона, осуществляют в заданный период времени пробоотбор целых тушек животных для трех проб, причем каждая проба содержит не менее 3 тушек особей рыжей полевки, и определяют в них методом хромато-масс-спектрометрии высокого разрешения наличие высокотоксичных для человека конгенов диоксинов, при этом загрязненность региона определяют по разнице - превышению концентраций в пробах тушек рыжей полевки летнего сезона, отобранных в период года – августе, относительно условно-фоновых значений диоксинов в пробах тушек рыжей полевки зимнего сезона, отобранных в период после схода снежного покрова.

Диагностическую ценность *Методической базы биомониторинга эффектов* определяет впервые обоснованный спектр характеристик экспрессии генов (по уровню транскрипции), отражающих как строго специфические реакции в отношении диоксинов (AhR), так и менее специфические: течение процессов биотрансформации ксенобиотиков (CYP1A2); иммунные и метаболические ответы на сопутствующие стрессовые воздействия (Keap1); реакции на уровне генов эпигенетической регуляции (DNMT). Модификационную активность этих генов и влияние на стабильность генома оценивают по взаимосвязи показателей транскрипции ряда мобильных генетических элементов (ретротранспозонов) и характеристик экспрессии генов-регуляторов (ДНК-метилтрансфераз). Совокупность получаемых показателей реактивности генов (уровни их экспрессии) и их изменения у обследуемых полевок на фоне локального присутствия экотоксикантов свидетельствуют о начальных проявлениях вызываемых этими соединениями эффектов.

Безопасность Электронно-лучевых технологий (ЭЛО) определена соответствием действующим нормам радиационной безопасности (такие сертификаты безопасности выдаются на ускорители электронов).

Программой предусмотрено:

Оценка токсичности и мутагенеза сточных вод до и после очистки. Метагеномный контроль таксономического состава, резистома, содержания патогенов/условных патогенов микробного сообщества стоков до и после очистки. Подбор оптимальных режимов очистки сточных вод при помощи ЭЛО.

Программа оценки безопасности работы ЭЛО для человека и окружающей среды предполагает двухэтапный план проведения исследований:

- первый этап – ориентировочно 2024 – 2026 гг (продолжительность этапа определяется сроком пуска в эксплуатацию стационарного или мобильного ускорителя). Цель планируемых исследований: изучение механизмов потери генотоксичности наиболее опасными мутагенами и канцерогенами для оптимизации управления процессами очистки сточных вод в условиях работы на лабораторном ускорителе;

- второй этап – ориентировочно 2026 - 2028 гг (в зависимости от степени готовности стационарного ускорителя к работе) - оценка биобезопасности очистки стоков, осадков сточных вод и газовых выбросов при обработке проб с использованием построенного стационарного высокомоощного ускорителя и мобильного ускорителя.

Испытание пилотной установки в условиях, приближенных к промышленному использованию, контроль и оценка химических, микробиологических, токсикологических параметров и опасности для населения сточных вод до и после очистки.

Испытания промышленной установки в условиях реальной эксплуатации, контроль и оценка химических, микробиологических, токсикологических параметров и опасности для населения сточных вод до и после очистки.

В соответствии с действующими международными и отечественными методическими документами оценку генетической безопасности проводят с использованием батареи стандартных тестов (обычно, не менее 3-х тестов, выявляющих различные виды эффектов с использованием разных тест-объектов).

В работе будут принимать участие 4 исследовательские группы специалистов, высококвалифицированных в проведении исследований в разных тестах на разных тест-объектах, включая обследование людей.

Все исследования на каждом этапе работы будут проведены по единому плану, что позволит получить многомерную характеристику механизмов реакций, протекающих при обеззараживании, даст достоверную оценку качеству очистки и эффективности работы ускорителей и, следовательно, станет основой для обоснованной оптимизации процессов очистки. Отдельной задачей биологического блока исследований станет оценка состояния здоровья населения, проживающего в непосредственной близости от водоочистных сооружений до и после введения в строй стационарного ускорителя.

В итоге: Разработка стандартизированной методологии оценки биогенной и техногенной угрозы здоровью человека, окружающей среде, вызываемой недостаточной степенью очистки и обеззараживания стоков, газовыбросов, илового осадка.

Осуществление прорывной инфраструктурной и технологической модернизации систем очистки и обеззараживания сточных вод (промышленных/сельскохозяйственных/коммунальных) на основе принципов химии и физики высоких энергий, прежде всего электронно-лучевой обработки (ЭЛО) и комбинированных методов для обеспечения радикального снижения негативной химической и биохимической нагрузки на население и окружающую среду

Создание условий формирования и развития экологического образования нового уровня, дополненного научными разработками.

Передача разработанных методов контроля качества сточных вод poste ЭЛО очистки подразделениям Роспотребнадзора. Текущий контроль качества работы промышленной установки ЭЛО очистки сточных вод. – Роспотребнадзор.

*Практическая работа* с использованием созданных способов и методов в рамках Программы по «Разработке и внедрению в производство комплекса прорывных, безопасных для человека и природы электронно-лучевых технологий и технических средств обезвреживания отходов и аварийных техногенных выбросов» предусматривает их адаптацию в отношении задач, решаемых с помощью ЭЛО технологии.

Комплексный подход, реализуемый в данных исследованиях, позволит определять реальную степень экологической угрозы, дать наиболее полную и глубокую оценку влияния загрязнений на здоровье человека, состояние окружающей среды.

**3. Комплексные задачи, на решение которых направлены комплексная программа/комплексный проект (необходимые и достаточные для достижения соответствующей цели комплексной программы/комплексного проекта), а также обоснование необходимости проведения фундаментальных научных исследований (для комплексной программы) или наличие необходимых научных заделов и научно-технических результатов (для комплексного проекта)**

Программа предусматривает полный инновационный цикл комплексных работ, скоординированных по задачам, срокам и ресурсам, включающий в себя научно-исследовательские, производственные и организационные работы. Фундаментальные научные исследования являются необходимым условием успешного создания и применения новой техники, разработки прорывных технологий и стратегий развития. Поэтому реализация программы предусматривает совершенствование научно-исследовательской базы и её использование в передовых научных исследованиях и разработках по заявляемым направлениям. Ранее требуемые ускорители высокой мощности не создавались и не использовались на практике. Как следствие, задачи фундаментальных научных исследований направлены на выяснение особенностей взаимодействия мощных электронных пучков с

веществом, на экологические показатели электронно-лучевой обработки, а также на определение условий реализации синергетических, цепных и пост-эффектов, обеспечивающих эффективность электронно-лучевой обработки отходов в промышленных масштабах.

Фундаментальные научные исследования по программе направлены на выяснение скорости и эффективности обезвреживания (перенос энергии между компонентами, обратимые и необратимые реакции, кинетика и механизм реакций, кислотно-основные равновесия, энергетический выход продуктов); свойств промежуточных и конечных продуктов (класс, стойкость, пост-эффекты, химическое и биохимическое потребление кислорода, хромофорность и др.); взаимного влияния компонентов и кислорода воздуха, влияния поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы на обезвреживание загрязнений; токсико-экологический анализ (см. **Приложение №1**). Эти исследования составляют основу для выработки требований к ускорителям и принципов управления электронно-лучевым обезвреживанием в зависимости от состава и расхода отходов. Производственная часть программы связана с созданием уникальной новой ускорительной техники и реакционного оборудования высокой производительности, соответствующей текущим и перспективным задачам широкомасштабного обезвреживания отходов. Организационная часть программы предусматривает согласование всех её составных частей по задачам, срокам и ресурсам, а также успешное продвижение результатов в экологическую, природоохранную, научную и образовательную практику.

Совокупность задач по программе будет включать исследования, разработку и совершенствование технологий использования электронных пучков для обезвреживания газообразных, жидких и твердых загрязнений; разработку, изготовление и оптимизацию модельных образцов ускорителей экологического назначения; разработку, изготовление и испытания реакционного технологического оборудования для электронно-лучевого обезвреживания загрязнений; разработку и совершенствование мощных серийных образцов ускорительной техники; разработку базовых технологических регламентов и иной технической документации для использования электронно-лучевых технологий; изготовление модельных и демонстрационных установок электронно-лучевого обезвреживания загрязнений; разработку, изготовление и испытание мобильного электронно-лучевого модуля для обезвреживания аварийных и чрезвычайных загрязнений, а также для демонстрационных испытаний; натурные испытания электронно-лучевой технологии на предприятиях и очистных сооружениях; разработку и внедрение программ обучения и подготовки кадров для электронно-лучевых технологий; популяризацию применения электронно-лучевых технологий в промышленной экологии и природоохранной практике; координацию программы с международными агентствами (ООН) и партнерами.

Вышеуказанная совокупность складывается в пять ключевых комплексных задач программы:

1. Разработка, создание и внедрение в научно-образовательную практику уникального научно-демонстрационного комплекса (установок, средств контроля и измерения, учебно-методических и информационных материалов) для электронно-лучевых исследований экологического назначения, включая:

- 1.1. Разработка решений по составу и размещению комплекса;
- 1.2. Оснащение и коммутация оборудования комплекса;
- 1.3. Испытание функциональных возможностей комплекса;
- 1.4. Внедрение комплекса в научную и образовательную практику;
- 1.5. Разработка, анализ и оптимизация электронно-лучевых технологий.

2. Разработка, производство и внедрение технологических высокомоментных электронных ускорителей экологического назначения, а также материалов, регламентирующих их применение, включая:

- 2.1. Разработка требований к прототипам ускорителей 2-х инновационных типов;

- 2.2. Проектирование промышленных вариантов ускорителей 2-х типов;
  - 2.3. Изготовление электронных ускорителей 2-х инновационных типов;
  - 2.4. Размещение, отладка и испытание электронных ускорителей;
  - 2.5. Привязка ускорителей 2-х типов к практическим природоохранным задачам.
3. Разработка, производство и внедрение комплекса реакционного технологического оборудования и технологии для электронно-лучевого обезвреживания газообразных, жидких и твердых отходов, в том числе:
- 3.1. Разработка требований к прототипам инновационных реакционных сосудов;
  - 3.2. Проектирование промышленных вариантов реакционных сосудов;
  - 3.3. Изготовление инновационных реакционных сосудов для разных сред;
  - 3.4. Размещение, отладка и испытание инновационных реакционных сосудов;
  - 3.5. Внедрение технологии и реакционного оборудования в практику.
4. Разработка, производство и внедрение мобильного электронно-лучевого модуля и технологии его использования для ликвидации аварийных и чрезвычайных загрязнений, включая
- 4.1. Разработка требований к прототипу мобильного электронно-лучевого модуля;
  - 4.2. Проектирование мобильного электронно-лучевого модуля;
  - 4.3. Изготовление мобильного электронно-лучевого модуля;
  - 4.4. Отладка и испытание мобильного электронно-лучевого модуля;
  - 4.5. Практическое внедрение мобильного электронно-лучевого модуля.
5. Разработка и внедрение комплексной методологии эко-мониторинга на объектах потенциального и текущего применения ЭЛО, включая
- 5.1. Изучение механизмов, закономерностей и особенностей формирования, развития и течения патологий, обусловленных загрязнениями;
  - 5.2. Разработка направлений совершенствования системы охраны здоровья населения, системы контроля и охраны окружающей среды на территориях, где имеет место или предполагается накопление загрязнений;
  - 5.3. Создание аналитической базы для развертывания прикладных исследований в области сбережения здоровья населения на загрязненных территориях;
  - 5.4. Обоснование новых экологических и природоохранных нормативов, опирающихся на развернутый анализ экологической ситуации на объектах отечественной инфраструктуры, включая проблемы, связанные с использованием устаревших технологий (см. **Приложение №1**)
  - 5.5. Экологическое образование населения и чиновников.

В области ЭЛО имеется значительный научный задел. Специалистами во всем мире исследованы фундаментальные и прикладные аспекты электронно-лучевого обезвреживания всевозможных загрязнений в воде, воздухе и твердых отходах. Все эти процессы опробованы на маломощных (до ~100 кВт) электронных ускорителях коммерческого (неэкологического) применения. По результатам исследований опубликовано свыше 10 000 оригинальных и обзорных научных статей, в частности:

- Ershov B. G. // *Russ. Chem. Rev.* 2004, 73 (1), 101–113. <https://doi.org/10.1070/RC2004v073n01ABEH000865>.
- Pikaev A. K. // *Water Sci. Technol.* 2001, 44 (5), 131–138. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0269>.
- Chmielewski A. G., Han B. // *Top. Curr. Chem.* 2016, 374 (5), 68. <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0069-4>.
- Wojnárovits L.; Takács E. // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2017, 311 (2), 973–981. <https://doi.org/10.1007/s10967-016-4869-3>.
- Makarov I. E., Ponomarev A. V. // *In Ionizing Radiation Effects and Applications*; InTech, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72074>.

- Gehringer P., Matschiner H. // *Water Sci. Technol.* 1998, 37 (8), 195–201. <https://doi.org/10.2166/wst.1998.0325>.
- Borrely S. I., et al. // *Radiat. Phys. Chem.* 2016, 124, 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.11.001>.
- Meeroff D. E., et al. // *Radiat. Phys. Chem.* 2019, 168, 108541. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108541>.
- Han B., et al. // *Water Sci. Technol.* 2005, 52 (10–11), 317–324. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0708>.
- Chmielewski A. G. // *Rev. Accel. Sci. Technol. Accel. Appl. Ind. Environ.* 2012, 147–159. <https://doi.org/10.1142/S1793626811000501>.
- IAEA. Achievements in the Removal of Biohazardous Pollutants by Radiation. 8 - 12 July, 2019; IAEA: Lisbon, Portugal, 2019.
- IAEA. Radiation Inactivation of Bio-Hazards Using High Powered Electron Beam Accelerators. 02 – 06 March, 2020.; IAEA: Tunisia, 2020.

В 2019–2021 годах российскими учеными в ведущих мировых и отечественных журналах опубликованы обзорные и аналитические статьи по ЭЛО:

- Ponomarev A.V., Ershov B.G. The Green Method in Water Management: Electron Beam Treatment. // *Environmental Science and Technology*, 2020, V. 54 (9), P. 5331–5344. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00545> (журнал 1-го квартиля)
- Ponomarev A.V. High-speed electron-beam water treatment: A technological consideration. // *Radiat. Phys. Chem.*, 2020, V. 172, P. 108812. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108812> (журнал 1-го квартиля)
- Ponomarev A.V. Radiolysis as a Powerful Tool for Polymer Waste Recycling. // *High Energy Chemistry*, V. 54, № 3, P. 194–204. <https://doi.org/10.1134/S0018143920030121>
- Yuri Kim, Ershov B.G., Ponomarev A.V. Features and Ways to Upgrade Electron-Beam Wastewater Treatment // *High Energy Chemistry*, 2020, Vol. 54, No. 6, pp. 462–468. <https://doi.org/10.1134/S0018143920060089>
- Vcherashnyaya A.S., Mikhailova M.V., Shapagin A.V., Poteryaev A.A., Stepanenko V.Yu., Ponomarev A.V. Radiation Modification of Adhesion Properties of Waste Plastics. *High Energy Chemistry*, том 55, № 4, с. 295–299. <https://doi.org/10.1134/S0018143921040159>
- Khusyainova D.N., Shapagin A.V., Ponomarev A.V. Radiation-stimulated oxidation of the plastic surface in a water-air flow. // *Radiat. Phys. Chem.*, 2022, V. 192, P. 109918. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109918>

Наиболее значимые исследования по тематике ЭЛО проводились и проводятся в Институте физической химии и электрохимии РАН (ИФХЭ РАН) и Институте ядерной физики СО РАН (ИЯФ СО РАН). Эти институты находятся в тесной координации с подразделениями МАГАТЭ и РОСАТОМа, занимающимися разработкой и производством электронно-лучевой техники.

Насущность развития и внедрения ЭЛО в обезвреживание загрязнений подчеркивалась на недавних форумах Международного Агентства по Атомной Энергии (МАГАТЭ) с участием российских специалистов:

- *Radiation Inactivation of Bio-Hazards using High Powered Electron Beam Accelerators*. TUNISIA, МАГАТЭ, Тунис, 2–6 марта 2020.
- *Enhancing the Recycling of polymer waste through radiation technology approaches*, Вена, МАГАТЭ, Австрия, 27–30 октября 2020.
- *Radiation technology for tackling plastic pollution. NUTEC Plastics. ROUNDTABLE FOR EUROPE AND CENTRAL ASIA*, Вена, МАГАТЭ, Австрия, 7 октября 2021.
- *Workshop on the Technical-Economic Feasibility studies to implement radiation technology for the recycling of polymer waste*, Вена, МАГАТЭ, Австрия, 24 августа - 16 ноября 2021.
- *Regional Training Course on Radiation Technology Applied as a tool for recycling of polymer waste*, Вена, МАГАТЭ, Австрия, 16–20 августа 2021.



Всего в мире насчитывается свыше 30 000 ускорителей. С их помощью производят высококачественные полимерные материалы, включая кабели, пенопласты, термоусадочные изделия, шины, упаковочные пленки, контейнеры и много другой полезной продукции, в том числе материалы и изделия *двойного назначения*. Например, в Японии 95% шин производится с помощью ускорителей. Во многих странах внедрена электронно-лучевая стерилизация продуктов питания и изделий медицинского назначения, а также радиационные технологии экологического назначения. Именно для этого в Китае каждый год прибавляется примерно по 50 ускорителей. В России свыше 50% всех одноразовых медицинских изделий (шприцы, бинты, халаты, катетеры и т.п.) стерилизуются с помощью электронно-лучевой техники. Настоящая программа предусматривает расширение сфер применения наукоемкой электронно-лучевой техники за счет её внедрения в практику обезвреживания широкого спектра загрязнений.

Необходимость научных исследований в рамках программы обусловлена задачей создания новой, не имеющих аналогов, электронно-лучевой техники высокой мощности и, соответственно, разработкой технологий, отвечающих этому повышенному уровню техники.

### **Комплексные задачи, возлагаемые на ИФХЭ РАН:**

1. Разработка, создание и внедрение в научно-образовательную практику уникального научно-демонстрационного комплекса (установок, средств контроля и измерения, учебно-методических и информационных материалов) для электронно-лучевых исследований экологического назначения;
3. Разработка, производство и внедрение комплекса реакционного технологического оборудования и технологии для электронно-лучевого обезвреживания газообразных, жидких и твердых отходов;
5. Разработка и внедрение комплексной методологии эко-мониторинга на объектах потенциального и текущего применения ЭЛО.

Уникальность научно-демонстрационного комплекса, создаваемого в рамках настоящей программы в ИФХЭ РАН, будет определяться следующими функциональными возможностями:

— это первый центр в РФ по **исследованию экологически-важных короткоживущих веществ**. Обычно имеют дело со стабильными материалами, свойства которых мало изменяются во времени. Однако в природоохранной практике, особенно при использовании электронно-лучевых процессов или redox-реагентов, свойства веществ быстро меняются под действием биохимических, электрофизических и химических процессов. Уже через секунды или минуты состав облученного материала существенно отличается от исходного. В таких случаях требуется экспресс-анализ непосредственно во время обработки или незамедлительно после неё.

— это первый центр в РФ по **безреагентному (нехимическому) решению крупных экологических задач** — т.е. по снижению зависимости от реагентов/инициаторов (вредных и неэкономичных), снижению потерь энергии, устранению стадий с избыточными температурами, давлениями и агрессивными средами, кардинальному повышению управляемости процессов.

— это первый центр в РФ по **применению технологических ускорителей**, т.е. ускорителей с высоким током пучка. В отличие от циклических и линейных ускорителей, используемых в физике, где нужна высокая энергия (обычно выше порога ядерных превращений;  $>8$  МэВ) и низкий ток пучка ( $<10$  мА), облучатели в УНДК призваны моделировать промышленно-значимые процессы при высоком токе пучка (выше 100 мА) и умеренной энергии (ниже 8 МэВ) - т.е. именно в условиях, соответствующих крупнотоннажным технологиям.

— это инновационное средство **анализа реакций, вызываемых сильнейшими окислителями и восстановителями**, не имеющими аналогов среди привычных химикатов. Обычно химическая стойкость веществ оценивается при сравнении с бихроматом, перманганатом, хлором и подобными сильными redox-агентами. Однако в электронно-лучевых процессах, короткоживущие радикалы обладают более высокой реакционной способностью, что требует новых подходов к анализу стойкости веществ.

— это необходимое средство для **трансфера электронно-лучевых разработок от стадии «науки» на стадию «производства»**. В целом по миру, электронно-лучевые технологии приносят ежегодно свыше 70 млрд. долларов прибыли. Россия обладает высоким научным потенциалом, позволяющим сделать рывок в прибыльном развитии и распространении электронно-лучевых технологий у себя и в дружественных странах.

— это первый центр по разработкам **во всем промышленно-значимом диапазоне энергии электронов (0.4-8 МэВ)**, что необходимо для разумного выбора и оптимизации технологических параметров ускорителей и управления электронно-лучевым процессом.

— это центр **исследования быстропротекающих химических процессов** посредством передовых приемов импульсного радиолиза, что кардинально расширяет перспективу фундаментальных исследований химического действия ионизирующих излучений на вещество на всех стадиях, включая поглощение энергии, разрыв химических связей, перенос возбуждения и заряда, образование промежуточных соединений и формирование конечных стабильных продуктов.

— это центр разработки уникальных методов и технологий **управления биоразлагаемостью отходов**, включая методы балансировки химического (ХПК) и биохимического (БПК) потребления кислорода, а также активирования/инактивирования микроорганизмов.

— это центр разработки **стойких безвредных материалов и сред для межпланетных полетов**, экологически безопасного освоения планет, моделирования жизненно-важных процессов в верхних слоях атмосферы и других участках космического пространства, подвергаемых действию космического ионизирующего излучения.

— это центр реализации **синергетических эффектов**, когда комбинирование электронно-лучевого метода с иными методами (сорбция, озонирование, коагуляция, флотация и т.п.) дает очистной эффект, превышающий сумму индивидуальных эффектов.

— это центр разработки методов **селективного модифицирования поверхностных или объемных свойств материалов**, включая прочность, окисляемость, проницаемость, проводимость и другие практически важные свойства.

— это центр **профессиональной подготовки** (обучение, стажировка, практика) молодых специалистов в области электронно-лучевых технологий, исследования радиационной стойкости материалов и химических закономерностей взаимодействия излучений с веществом. Сегодня студенты, аспиранты и молодые специалисты в подавляющем большинстве регионов не имеют доступа к реализации знаний на практике.

Данные содержатся также в Приложении №2, №3, №4.

#### **Комплексные задачи программы, возлагаемые на ИЯФ СО РАН:**

1. Для выполнения задачи по программе необходимы новые сверхмощные ускорители электронов. Предполагается **разработать ускоритель с максимальной энергией в диапазоне 1.2 – 1.5 МэВ и мощностью электронного пучка – 500 кВт**. Кроме того, ИЯФ СО РАН подготавливает свою часть исходных данных и технического задания для создания полномасштабных радиационно-технологических промышленных комплексов обезвреживания отходов. По мере изготовления ускорители испытываются в ИЯФ на вновь созданном стенде.

Предлагается **разработка, производство и внедрение мобильного электронно-лучевого модуля** и технологии его использования для ликвидации аварийных и чрезвычайных загрязнений. Подобная установка была создана ИЯФ совместно с Южно-Корейской фирмой EB-Tech. С учетом предыдущего опыта и необходимости импортозамещения мобильная установка может быть успешно реализована.

2. В настоящее время в ИЯФ СО РАН не имеется здания или бункера, пригодного для испытаний как высокомошных ускорителей, так и совместимого с ними технологического оборудования. Поэтому **строительство здания и создание такого стенда является первоочередной задачей**. На базе этого стенда будет производиться отработка конструкции высокомошных ускорителей и полномасштабной отработки электронно-лучевых технологий.

3. Новый стенд существенно **расширит возможности уже существующей в ИЯФ СО РАН УНУ ускоритель ЭЛВ-6**. Эта уникальная установка позволяет проводить эксперименты с выведенным в атмосферу электронным пучком, но ее максимальная мощность составляет 100 кВт.

4. В ИЯФ СО РАН базируется кафедра Электрофизических Установок и Ускорителей Физико-технического Факультета Новосибирского Государственного Технического Университета. Она располагает бакалавриатом и магистратурой. На ее **основе возможна подготовка руководителей как среднего, так и высшего звена комплексов электронно-лучевой обработки промышленного обеззараживания**. Считаем необходимым подключить к программе НГТУ в качестве образовательного учреждения.

Для оценки биологической эффективности ЭЛО очистки необходимо исследование структуры микробного сообщества, количества и состава генов антибиотикорезистентности, наличия условно патогенных/патогенных микроорганизмов до и после ЭЛО очистки по сравнению с используемыми методами очистки сточных вод (см. **Приложение №1**).

#### **4. Предполагаемые сроки и этапы реализации комплексной программы/комплексного проекта**

Выполнение полного инновационного цикла комплексных работ, скоординированных по задачам, срокам и ресурсам, включающего в себя научные исследования и необходимые этапы создания технологий, продукции и оказания услуг, рассчитано на 10 лет и включает следующие этапы:

№	Наименование этапа	Содержание работ	Сроки, годы
1	Разработка технических требований к ключевому оборудованию. Комплектование научно-исследовательского комплекса.	Определение ключевых параметров научно-исследовательского комплекса, а также стационарных ускорителей, мобильного модуля, реакционного оборудования. Токсико-экологический анализ. Заказ, изготовление и комплектование научно-исследовательского комплекса.	2023-2024
2	Разработка конструкции ускорителей и реакционного оборудования. Запуск научно-исследовательского комплекса.	Проектирование элементов стационарных ускорителей, мобильного модуля и реакционного подпучкового оборудования. Токсико-экологический анализ. Завершение комплектования и запуск научно-исследовательского комплекса. Публикационная деятельность.	2024-2025
3	Комплектование и изготовление	Разработка, приобретение и изготовление технологической оснастки	2025-2026

№	Наименование этапа	Содержание работ	Сроки, годы
	технологической оснастки и помещений для производства оборудования. Фундаментальные исследования.	и емкостных элементов для производства стационарных ускорителей, мобильного модуля и реакционного оборудования. Токсико-экологический анализ. Фундаментальные исследования эффективности распределения энергии электронных пучков в жидких, твердых и газообразных средах, подлежащих обезвреживанию. Публикационная деятельность.	
4	Изготовление стационарных ускорителей. Прикладные исследования.	Изготовление и проверка элементов стационарных ускорителей. Сборка и проверка ключевых блоков и узлов. Токсико-экологические и физико-химические исследования сред, подлежащих обезвреживанию. Публикационная деятельность.	2026-2027
5	Тестирование и оптимизация стационарных ускорителей. Изготовление оборудования для мобильного модуля. Разработка технологических регламентов.	Сборка и стендовые испытания стационарных ускорителей. Комплектование и изготовление элементов мобильного модуля и реакционного оборудования. Составление инструкций и иных регламентирующих документов по эксплуатации оборудования. Токсико-экологические и физико-химические исследования сред, подлежащих обезвреживанию. Публикационная и образовательная деятельность.	2027-2028
6	Разработка решений по размещению оборудования. Подготовка монтажных систем. Экологические тесты.	Выбор/строительство технологических площадок и помещений для размещения оборудования; их оснащение необходимыми коммуникациями, монтажным оборудованием и средствами контроля. Токсико-экологические и физико-химические исследования сред, подлежащих обезвреживанию. Публикационная и образовательная деятельность.	2028-2029
7	Размещение, запуск и наладка оборудования. Пробные испытания на реальных средах.	Транспортировка, установка, сборка, запуск и наладка стационарных ускорителей, а также подпучкового реакционного оборудования. Сборка и испытания мобильного модуля. Пробные испытания на реальных средах. Токсико-экологические и физико-химические исследования сред, подлежащих обезвреживанию.	2029-2030

№	Наименование этапа	Содержание работ	Сроки, годы
		Публикационная и образовательная деятельность.	
8	Сопряжение электронно-лучевого и традиционного очистного оборудования. Испытание и приемка оборудования.	Сопряжение электронно-лучевого оборудования с системами питания, ввода-вывода сред, анализа, оповещения и другими коммуникациями очистных сооружений. Испытание и приемка оборудования. Токсико-экологические и физико-химические исследования сред, подлежащих обезвреживанию. Публикационная и образовательная деятельность.	2030-2031
9	Подготовка документации для серийного производства и внедрения. Популяризация технологии.	Отладка технологии. Оптимизация оборудования. Составление технической документации для серийного производства оборудования и использования технологии. Токсико-экологические и физико-химические исследования обезвреживаемых сред. Публикационная и образовательная деятельность.	2031-2032
10	Авторский надзор за использованием технологии. Продвижение и оптимизация технологии.	Отладка технологии. Оптимизация оборудования. Авторский надзор за использованием технологии. Токсико-экологические и физико-химические исследования обезвреживаемых сред. Перспективное планирование развития технологии. Публикационная и образовательная деятельность.	2032-2033

Наиболее длительными являются разработка, изготовление и отладка ускорителей, а также фундаментальные научные исследования в новых технологических областях. Исходя из мировой практики, создание новой модели ускорителя или принципиальная модернизация уже разработанного прототипа занимает от 1.5 до 2 лет. При этом стоимость создания новой модели ускорителя мощностью  $\geq 400$  кВт с энергией пучка 1 МэВ оценивается на мировом рынке суммой до 4.5 млн долларов США. В рамках программы предполагается создание двух новых моделей ускорителей.

Оценка биологической эффективности и экологической безопасности электронно-лучевой обработки сточных вод будет проводиться на всех этапах испытания опытных и промышленных образцов. Разработка рекомендаций по оценке биологической эффективности и экологической безопасности сточных вод после ЭЛО займёт 1 год на завершающем этапе исследования.

**5. Предполагаемый ответственный исполнитель-координатор комплексной программы/комплексного проекта (федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере, соответствующей направлениям реализации комплексной программы, комплексного проекта, или иной главный распорядитель средств федерального бюджета в сфере научно-технической или производственной**

**деятельности, соответствующей направлениям реализации комплексной программы/комплексного проекта, отвечающий за их реализацию и достижение целевых показателей)**

Министерство природных ресурсов и экологии РФ.

**6. Предполагаемый соисполнитель комплексной программы/комплексного проекта (федеральный орган исполнительной власти и (или) иной главный распорядитель средств федерального бюджета, отвечающий за реализацию комплексной программы, комплексного проекта и достижение их целевых показателей)**

Министерство науки и высшего образования РФ.

**7. Предполагаемые участники комплексной программы/комплексного проекта (органы государственной власти, научные и образовательные организации, иные организации различных форм собственности, институты развития)**

ФГБУН Институт Физической Химии и Электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН, головной исполнитель, экспериментальная часть, анализы, основы технологии, ТЗ на технологию), ФГБУН Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера Сибирского Отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН, изготовление ускорителя и подпучковой оснастки, ТЗ на размещение), ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова Российской академии наук (ИПЭЭ РАН, токсико-экологические исследования), ФГБУН Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН, Санкт-Петербургский филиал (СПбФИОГен РАН), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» (ЮФУ), АО НИИ Электрофизической Аппаратуры им. Д.В. Ефремова ГК Росатом (НИИЭФА, разработка и изготовление подпучкового оборудования и моно-пучкового ускорителя, ТЗ), НИИ Технической Физики и Автоматизации ГК Росатом (НИИТФА, разработка и проектирование, ТЗ), ФГБОУВС Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова (экспериментальная часть, разработка рекомендаций, аналитические исследования, экспертиза технических решений, подготовка научных кадров), Российский Химико-технологический Университет им. Д.И. Менделеева (подготовка исследовательских программ, обучение и переквалификация инженерно-технологических кадров, экспертиза технических решений), АО Мосводоканал (консультант), НИИ и КБ территориальных водоканалов (опытное освоение, испытание, разработка рекомендаций).

Участники программы имеют обширные долгосрочные договорные отношения с ключевыми Российскими и зарубежными компаниями, включая сотрудничество по экологическим направлениям с предприятиями Госкорпорации «Росатом», ПАО «Газпром», ГК Корпорация «ГазЭнергоСтрой», ОАО «Татнефтехиминвест-Холдинг», ООО «Телекор-Энергетика», ФГУП ПО «МАЯК», ОАО «Корпорация «Росхимзащита», АО «ЭНПО Неорганика», ФБУ «НТЦ ЯРБ», ФГБОУ ВО «НГТУ», ЗАО «ЗДРАВМЕДТЕХ-К», АО «Смерфит Каппа Санкт-Петербург», ООО «Жасмин Мед». ФГУП «ГХК», АО «СХК», АО «Сибирский химический комбинат», ФГБУН ИБРАЭ РАН, АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов», International Atomic Energy Agency, АО «Концерн Росэнергоатом», АО «ОДЦ УГР», АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» и др.

Возможный индустриальный партнёр ГК Корпорация «ГазЭнергоСтрой» (стадия переговоров), ГК «Росатом» (стадия переговоров).

Правительство Москвы и АО Мосводоканал уделяют большое внимание экологической обстановке в городе, готовы поддерживать перспективные направления инновационного развития технологий очистки сточных вод, выступить консультантом в разработке

программы.

При подготовке программы получены положительные отклики от регионов. В частности Минприроды и Минобрнауки Хабаровского края отметили : «проблемы очистки загрязненных сточных вод актуальны для системы водоотведения всех субъектов РФ».

Список участников может быть дополнительно оптимизирован на основе мнения экспертов.

Инициаторы считают целесообразным участие ЦКП и ресурсных центров НИЦ «Курчатовский институт» в выполнении проекта. НИЦ «Курчатовский институт» - один из ведущих научных центров мира, междисциплинарная национальная лаборатория. Под эгидой НИЦ "Курчатовский институт" объединена значительная часть научного потенциала страны в области ядерной физики, энергетики, материаловедения, информационных технологий, биологии и генетики. В рамках НИЦ "Курчатовский институт" сосредоточен научный, технологический и кадровый потенциал, необходимый для развития принципиально новых отраслей науки и технологий, разработки и освоения перспективных производственных технологий на основе крупных, уникальных исследовательско-технологических мегаустановок и комплексов (мегасайенс). Со дня основания в Курчатовском институте реализуется междисциплинарный подход, нацеленный на замкнутый цикл: от фундаментальных исследований до конечных технологий. Целями Института является формирование технологической базы инновационной экономики; обеспечение научно-технологического прорыва в области реализации приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации; создание правовых и организационных основ деятельности новых научных инновационных структур.

В п. 9 заявки представлено распределение задач по конкретным организациям.

**8. Потенциальные заказчики комплексной программы/комплексного проекта (организации реального сектора экономики, заинтересованные в использовании научных, научно-технических результатов комплексной программы/комплексного проекта и участвующие в выполнении и реализации их мероприятий с целью производства продукции и оказания услуг), а также перечни потенциальных рынков, на которых будут востребованы предлагаемые к разработке и производству продукты и технологии, а также предлагаемые к оказанию услуги**

Потенциальные заказчики - Субъекты РФ, промышленные предприятия, относящиеся к объектам Первой Категории негативно воздействующим на окружающую среду (такие как п/п Росатома, п/п целлюлозно-бумажного, гидролизного, нефтегазового профиля, очистные сооружения городского хозяйства), п/п с/х, включая п/п животноводческого комплекса, п/п подготовки воды, очистки и обеззараживания осадков сточных вод, обработки ила, шламов, обеззараживания медицинских отходов крупных больничных комплексов, очистки выбросных газов, и др.

В области электронно-лучевого обезвреживания отходов были проведены успешные НИР и НИОКР с АО «Сегежский ЦБК», АО «Кондопожский ЦБК», АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат», ОАО «Архангельский гидролизный завод», ОАО «Соломбальский целлюлозно-бумажный комбинат», Целлюлозный завод «Питкяранта», ООО «Кама Картон», ОАО "Пермский лесозавод», ОАО «Байкальский ЦБК", ЦБК Группы «Илим», ПАО АНК «Башнефть», ПАО «Татнефть», ОАО «Татнефтехиминвест-Холдинг», АО «ЛУКОЙЛ», АО «ВоронежСинтезКаучук», АО «ПКС-ВОДОКАНАЛ», АО «МОСВОДОКАНАЛ» и другими. Все эти предприятия обладают крупнотоннажными отходами, для обезвреживания которых нужны мощные электронно-лучевые установки. Соответственно, ключевой проблемой, препятствовавшей внедрению результатов, являлись недостаточная мощность имевшихся ускорителей и/или отсутствие удобной технологической площадки. Электронно-лучевые установки были внедрены в АО «ВоронежСинтезКаучук», компании DueTech (Республика Корея), компании EUTech (Республика Корея). В компании

DyeTech впервые был внедрен экспериментальный ускоритель мощностью 400 кВт (генерирующий три параллельных пучка), разрабатываемый в ИЯФ СО РАН при технологическом сопровождении со стороны ИФХЭ РАН. Эти установки послужили прототипами для нескольких очистных установок в Китайской Народной Республике, Индии и на Ближнем Востоке, но на базе маломощных ускорителей (до 130 кВт), предназначенных для модифицирования пластиков.

Высокая эффективность ЭЛО при решении экологических задач доказана на опытно-промышленных и демонстрационных установках в 25 ведущих странах, включая Россию, Японию, США, Францию, Италию, Германию, Израиль, Китай, Польшу, Венгрию, Болгарию, Нидерланды, Республику Корея и другие (Woods, R.; Pikaev, A. *Applied Radiation Chemistry. Radiation Processing.*; Wiley: NY, 1994). Общий вывод – внедрение ЭЛО в промышленность тормозится отсутствием мощных электронных ускорителей экологического назначения.

Правительство Москвы и АО «Мосводоканал» уделяет большое внимание экологической обстановке в городе и в целях обеспечения эффективного использования потенциала РАН в формировании и развитии инновационной инфраструктуры города Москвы готовы выступить консультантом в разработке проекта. «АО «Мосводоканал» поддерживает перспективные направления инновационного развития технологий очистки сточных вод. Готовность применению нашим обществом современных эффективных решений подтверждается программой развития системы водоснабжения и канализации города, разработанной с нашим участием. Программа предусматривает инновационные разработки, соответствующие самым жестким современным стандартам. Специалисты МВК готовы принять участие в качестве консультантов при выборе технологии очистки х/б стоков и сточных вод» (Протокол (04)03.05-44/20 от 25.03.2020).

Заключено «Соглашение о сотрудничестве между Правительством Москвы и РАН» 24 апреля 2018, предусматривающее «содействие развитию производственной и научно-технической кооперации между научными организациями, расположенными на территории г. Москвы, в целях эффективного использования потенциала РАН в формировании и развитии инновационной инфраструктуры г. Москвы, а также проведение экспертизы результатов научных исследований, инновационных проектов, претендующих на получение поддержки Правительства Москвы».

Научно-технический Совет ВПК РФ провел совещание 21 ноября 2018г. под председательством заместителя председателя коллегии Военно-промышленной Комиссии РФ академика Ю.М. Михайлова и по итогам рассмотрения рекомендует: «3.1 Одобрить работы, направленные на создание технологий очистки и обеззараживания воды, отметив их перспективу для промышленного освоения и развития, в том числе в рамках диверсификации продукции оборонно-промышленного комплекса» (Протокол №ЮМ-П22-15пр от 21.11.2018).

При подготовке программы получены отклики от регионов. В частности, из Хабаровска: «По поручению Губернатора Хабаровского края Дегтярева М.В. Министерство природных ресурсов совместно с Минобрнауки края рассмотрело ваше обращение, в котором обозначена социально-значимая экологическая проблема очистки стоков и предложения по ее решению и сообщает следующее. «Поднятые в обращении проблемы очистки загрязненных сточных вод актуальны для системы водоотведения всех субъектов РФ, поэтому поддерживаем вашу инициативу по их комплексному решению с привлечением ведущих научных учреждений. Разработка КНТП и создание Центра компетенций будет способствовать продвижению и внедрению передовых методов очистки и обеззараживания сточных вод» (письмо № М 27-11-66-101 от 18.03.2021г.)

Правительство Ярославской области «солидарно с Вашей позицией о необходимости полной модернизации большинства очистных сооружений с изменением технологии очистки. Необходимо стимулировать современные, высокотехнологичные, экономически эффективные и экологически безопасные технологии, развивать экологическое просвещение, повышать уровень экологической ответственности в стране в целом. Правительство области



поддерживает внедрение современных технологий в сферу водоснабжения и водоотведения, так как это позволит улучшить экологическую ситуацию в регионе и в стране в целом.» (письмо № ОГ.01-9279/17 от 26.09.2017г.)

В области стерилизации изделий медицинского назначения и продуктов питания, электронно-лучевая обработка не имеет конкурентов. Естественно, стерилизующий эффект облучения электронами действует и при обработке любых иных загрязнений. Во-первых, происходит прямое разрушение микроорганизмов за счет расщепления ДНК электронным пучком. Во-вторых, имеет место разрушение ДНК ионами и радикалами, возникающими из воды и/или воздуха. Как следствие, микроорганизмы утрачивают способность к воспроизводству и гибнут.

Наряду с экологическим и природоохранным секторами экономики, потенциальными рынками электронно-лучевых технологий и оборудования являются: создание уникальных высокопрочных материалов и модифицирование свойств материалов (кабельная, полимерная, медицинская, химическая, авиационная, ракетно-космическая промышленность); преобразование сырья в готовые материалы и продукты (тяжелый органический синтез, производство строительных материалов, предприятия топливной, перерабатывающей, пищевой и легкой промышленности); повышение сохранности сельскохозяйственной продукции (повышение сроков хранения, увеличение всхожести семян, дезинсекция, дезинфекция, повышение усвояемости кормов); стерилизация изделий и материалов медицинского назначения; создания *материалов и устройств двойного назначения*.

В области экологических и природоохранных задач, электронно-лучевые технологии востребованы для следующих потенциальных рынков:

- обезвреживание сточных вод;
- водоподготовка и питьевое водоснабжение;
- нейтрализация дымовых газов и производственных испарений;
- интенсификация систем биохимической обработки сточных вод;
- дезинфекция и дезинсекция твердых органических отходов;
- утилизация и рециклинг пластиковых отходов;
- повышение биоразлагаемости стойких загрязнений;
- получение топлива и химикатов из растительных и синтетических отходов;
- нейтрализация загрязнений почвы и строительных конструкций;
- дезодорация воздуха и разрушение аэрозолей;
- детоксикация и стерилизация сред.

По данным Международного Агентства по Атомной Энергии (МАГАТЭ, см. Consultants' meeting of IAEA on technical and economic evaluation of the radiation treatment of wastewater, 2000; IAEA Technical Meeting on Emerging Applications of Radiation Processing for the 21st Century, 2003), электронно-лучевое обезвреживание стоков имеет наивысшую энергетическую эффективность (энергозатраты от 0.5 кДж/кг). Вместе с тем, наивысшей экономической эффективностью обладают установки с большим объемом перерабатываемых стоков (10 тысяч м<sup>3</sup>/сутки и более). В настоящей программе предполагается создать уникальные стационарные ускорители с производительностью обезвреживания сточных вод не менее 40 тысяч м<sup>3</sup>/сутки и разработать технологии, требующие для случая жидких систем не выше 3 кГр (3 кДж/кг) энергетических затрат.

**9. Оценка ресурсов, необходимых для реализации комплексной программы/комплексного проекта (описание материальной производственной базы, инжиниринговых центров и иных объектов инфраструктуры, отвечающих задачам комплексной программы/комплексного проекта; описание финансовой обеспеченности потенциального заказчика и (или) потенциальных участников; кадровое обеспечение потенциального заказчика и (или) потенциальных участников (наличие у них работников, способных решать задачи комплексной программы/комплексного**

**проекта); наличие у потенциального заказчика и (или) потенциальных участников производственных мощностей для выпуска разрабатываемой продукции; наличие между потенциальным заказчиком и (или) потенциальными участниками договоров о научно-производственном партнерстве, включающих условия о софинансировании реализации комплексной программы, комплексного проекта, о предоставлении и (или) передаче прав на результаты интеллектуальной деятельности, о дооснащении оборудованием, о проведении исследований, о создании лабораторий)**

**ИФХЭ РАН** – ведущий разработчик научных основ электронно-лучевых технологий. Создатель технологий и установок для электронно-лучевой очистки сточных вод, газов и твердых отходов, внедренных за рубежом и в РФ. Обладает 3-мя ускорителями электронов (линейные УЭЛВ-10-10Т и LINS-02-500, прямого действия УРТ-1М), квалифицированными кадрами и специализированным научным оборудованием для электронно-лучевых исследований. Имеющиеся ускорители позволяют проводить фундаментальные исследования по любому экологическому направлению, но не позволяют моделировать реальные технологические условия (несоответствие энергии, плотности тока пучка и развертки пучка). Для расширения возможности прикладных исследований планируется создать специализированный исследовательский комплекс. ИФХЭ РАН имеет Центр коллективного пользования физико-химическими методами исследования. Осуществляет партнерское сотрудничество с широким кругом Институтов РАН, ВУЗами и производственными предприятиями. Сотрудники Института проводят экспертизу и координацию международных проектов по линии МАГАТЭ и ЮНЕСКО. Задачи в рамках программы – экспериментальные исследования, технологические разработки, координация технических заданий и базовой проектной документации.

ИФХЭ РАН располагает 5-ю специализированными лабораториями, компетентными исследования в области химии и физики высоких энергий - лаборатория радиационных технологий (руководитель д.т.н. Павлов Ю.С.), лаборатория электронно-лучевой конверсии энергоносителей (руководитель д.х.н. Пономарев А.В.), лаборатория электронных и фотонных процессов в полимерных наноматериалах (руководитель д.х.н. Некрасов А.А.), лаборатория радиационно-химических превращений материалов (руководитель член-корреспондент РАН Ершов Б.Г.), лаборатория радиоэкологических и радиационных проблем (руководитель академик Мясоедов Б.Ф.). В этих лабораториях трудятся 13 докторов наук и 23 кандидата наук. Научные должности: 9 главных научных сотрудников, 7 ведущих научных сотрудников, 16 старших научных сотрудника, 10 научных сотрудников и 4 младших научных сотрудника.

В ИФХЭ РАН действуют также 8 других лабораторий, связанных с исследованиями взаимодействия ионизирующих излучений с веществом (радиохимия, радиоэкология). Сотрудники этих лабораторий также могут привлекаться к выполнению работ по программе.

Комплекс ускорителей ИФХЭ РАН представляет собой Уникальную Научную Установку – УНУ КРХИ (регистрационный номер УНУ на официальном сайте [www.ckp-rf.ru](http://www.ckp-rf.ru): 2056048; <https://phyche.ac.ru/structure/nauchnye-podrazdeleniya/unu-krkhi>). В состав УНУ включены: 1. Линейный ускоритель электронов LINS-03-350-EURF; 2. Радиационно-технологическая установка электронно-лучевой стерилизатор ЭЛС-2 с линейным ускорителем УЭЛВ-10-10-С-70; 3. Наносекундный импульсно-периодический ускоритель УРТ-1М.

Для размещения УНУ, Институт располагает специализированным кирпичным зданием (ул. Обручева 40 стр. 5; инв. № 103, начальная стоимость 6 227 080,11 рублей на 01.10.1968 г.; с подземными и надземными помещениями), предназначенным для работы ускорителей электронов и иных источников ионизирующих излучений. Общая площадь 1032,9 кв.м, включая 5 бункеров с бетонной радиационной защитой, 2 пультовых помещения, механический участок и 9 вспомогательных комнат. В специальном помещении под куполом размещена историческая реликвия - первый в СССР и третий в мире ускоритель Cockcroft-Walton (У-003).

Ускорители ИФХЭ РАН востребованы и используются академическими Институтами, образовательными учреждениями (МГУ им. М.В. Ломоносова, МИТХТ, РХТУ им. Д.И.Менделеева, МАИ, МГТУ, МИФИ, МФТИ) и коммерческими компаниями РФ в фундаментальных и прикладных химических и физико-химических исследованиях в рамках Государственных программ, проектов и грантов научных фондов Российской Федерации, в том числе фундаментальных и прикладных исследований по оборонной тематике в рамках Государственного Оборонного заказа. В расширении функциональных возможностей УНДК заинтересованы также Государственные корпорации (ГазПром, РосАтом, РосКосмос, РосТех, РосНефть), МО РФ, ФСБ РФ, Международное Агентство по Атомной Энергии (МАГАТЭ). Услугами облучательного центра ежегодно пользуются более 20 организаций различного профиля и их число существенно возрастет в результате развития инфраструктуры и функциональных возможностей УНДК. Комплекс задействован в обучении студентов профильных вузов и аспирантов, в подготовке диссертационных работ, в получении новых научных результатов, публикуемых в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах. В частности, ускорители Института используются для масштабной стерилизации изделий медицинского назначения для компаний из разных регионов страны.

Данные содержатся также в разделах 2 и 9, Приложении №2, №3, №4. Помимо ссылок приложены тексты семи статей.

**ИЯФ СО РАН** – ведущий изготовитель и разработчик промышленных ускорителей электронов. Поставляет ускорители в 30 стран мира. Создатель мобильных ускорителей и установок. Проводит эксперименты по электронно-лучевой обработке модельных и реальных образцов. Разрабатывает новые модели сверхмощных ускорителей. Имеет собственные производственные мощности и приборы для физико-химических исследований. Ключевые задачи в рамках программы – изготовление мульти-пучкового ускорителя средней мощности и испытательного стенда для него, разработка мобильной испытательно-демонстрационной установки, проведение наладочных работ и ресурсных испытаний.

Для выполнения задачи по программе необходимы новые сверхмощные ускорители электронов. Предполагается **разработать ускоритель с максимальной энергией в диапазоне 1.2 – 1.5 МэВ и мощностью электронного пучка – 500 кВт**. Кроме того, ИЯФ СО РАН подготавливает свою часть исходных данных и технического задания для создания полномасштабных радиационно-технологических промышленных комплексов обезвреживания отходов. По мере изготовления ускорители испытываются в ИЯФ на вновь созданном стенде.

Предлагается **разработка, производство и внедрение мобильного электронно-лучевого модуля** и технологии его использования для ликвидации аварийных и чрезвычайных загрязнений. Подобная установка была создана ИЯФ совместно с Южно-Корейской фирмой EV-Tech. С учетом предыдущего опыта и необходимости импортозамещения мобильная установка может быть успешно реализована.

В настоящее время в ИЯФ СО РАН не имеется здания или бункера, пригодного для испытаний как высокомоощных ускорителей, так и совместимого с ними технологического оборудования. Поэтому **строительство здания и создание такого стенда является первоочередной задачей**. На базе этого стенда будет производиться отработка конструкции высокомоощных ускорителей и полномасштабной отработки электронно-лучевых технологий. Новый стенд существенно **расширит возможности уже существующей в ИЯФ СО РАН УНУ ускоритель ЭЛВ-6**. Эта уникальная установка позволяет проводить эксперименты с выведенным в атмосферу электронным пучком, но ее максимальная мощность составляет 100 кВт.

В ИЯФ СО РАН базируется кафедра Электрофизических Установок и Ускорителей Физико-технического Факультета Новосибирского Государственного Технического Университета. Она располагает бакалавриатом и магистратурой. На ее **основе возможна**

**подготовка руководителей как среднего, так и высшего звена комплексов электронно-лучевой обработки промышленного обеззараживания.** Считаем необходимым подключить к программе НГТУ в качестве образовательного учреждения.

**НИИЭФА** – старейший и авторитетнейший разработчик сверхмощных высоковольтных ускорителей электронов, имеющий богатый опыт международного сотрудничества. Создатель крупнотоннажных установок для электронно-лучевой очистки газов и сточных вод. Обладает собственным производством и исследовательским оборудованием. Разрабатывает и производит силовое и контрольно-измерительное оборудование для высоковольтных технологий. Основные задачи в рамках программы – изготовление и испытание монопучкового ускорителя для высокоскоростных потоков и цилиндрических реакторов, проведение пуско-наладочных работ и функциональных испытаний.

Данные об ассортименте выпускаемых ИЯФ и НИИЭФА ускорителей:  
Технологические DC ускорители электронов, производимые в ИЯФ СО РАН

Модель	Энергия, МэВ	Мощность, кВт	Ток пучка, мА
ELV-mini	0.2 - 0.4	20	50
ELV-0.5	0.4 – 0.7	25	40
ELV-1	0.4 – 0.8	25	40
ELV-2	0.8 – 1.5	20	25
ELV-3	0.5 – 0.7	50	100
ELV-4	1.0 – 1.5	50	100
ELV-6	0.8 – 1.2	100	100
ELV-6M	0.75 – 0.95	160	200
ELV-8	1.0 – 2.5	90	50
ELV-12	0.6 – 1.0	400	400
Torch	0.5 – 0.8	500	800

Технологические DC ускорители электронов, производимые в НИИЭФА

Модель	Энергия, МэВ	Мощность, кВт	Ток пучка, мА
RTE(D)-1	1.0	3	3
Electron-1-3	0.7	7-10	15
Aurora-1,2 Electron-4	0.5	25	50
Aurora -3-9	0.3-0.75	20	70
Model PA	1.0	100	100
Electron-6	1.5-2.5	60	120
Electron-7	1.0	100	100
Electron-10	0.75	50	70
Electron-23	1.0	500	500

Таблица с ассортиментом ускорителей, производимых в НИИЭФА, показывает, что

преобладают ускорители мощностью до 100 кВт. Ускоритель Электрон-23 является экспериментальным и еще не запущен в серийное производство. Поэтому по сегодняшним меркам, НИИЭФА является «создателем крупнотоннажных установок для электронно-лучевой очистки газов и сточных вод», однако сегодняшний масштаб не отвечает перспективным экологическим задачам и потребностям.

**ИПЭЭ РАН** – признанная экспертная организация в области фундаментальных исследований проблем экологии, эволюции и биоразнообразия. В Институте изучают проблемы общей и частной экологии животных, биоразнообразия, поведения и эволюционной морфологии животных, разрабатывают рекомендации по охране природы. Институт обладает мощной сетью филиалов (3), научных центров (2) и биостанций (8) в различных климатических зонах России и за рубежом. Основные задачи в рамках программы – эколого-аналитический контроль экотоксикантов в объектах окружающей среды, решение фундаментальных проблем охраны живой природы, исследования вопросов биологического разнообразия и устойчивого (рационального) использования биологических ресурсов.

**СПбФ ИОГен РАН** - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова Российской академии наук, Санкт-Петербургский филиал (СПбФ ИОГен РАН). Оценка эффекта электронно-лучевой обработки на уровень мутагенной активности сточных вод будет проводиться на всех этапах испытания опытных и промышленных образцов. Разработка рекомендаций по оценке мутагенной активности сточных вод до и после электронно-лучевой обработки.

**ЮФУ** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», крупнейший научно-образовательный центр Юга России. В состав ЮФУ входит ряд научных и учебных подразделений, реализуется более 90 научных направлений. Исследования в экологической безопасности, области биотехнологии, технологии живых систем, медицине будущего осуществляются в Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского. В АБиБ ЮФУ активно проводятся метагеномные исследования природных микробных сообществ, находится единственная в России научная группа занимающаяся метагеномными исследованиями распространения генов резистентности к антибиотикам в природных и антропогенных (сточные воды) экосистемах, сотрудники обладают более чем десятилетним опытом систематического применения комплекса цельноклеточных бактериальных lux-биосенсоров для экотоксикологических исследований. АБиБ имеет обширные научные связи со многими научно-производственными учреждениями и научно-исследовательскими институтами, в т.ч. Российской академии наук.

Задачи, выполняемые ЮФУ: **определение общей (интегральной) токсичности**; оценка биологической эффективности и экологической безопасности электронно-лучевой обработки сточных вод по сравнению с используемыми в настоящий момент способами очистки на всех этапах испытания опытных и промышленных образцов. Разработка рекомендаций по оценке биологической эффективности и экологической безопасности сточных вод после ЭЛО.

**ФГБУ «ЦСП» ФМБА России** – ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью» Федерального медико-биологического агентства России занимается экспертно-аналитической деятельностью, среднесрочным и перспективным прогнозированием развития научно-исследовательской, научно-технической деятельностью, экспериментальными разработками в сфере токсикологии, генетики,

микробиологии, синтетической биологии, экологии человека, организации здравоохранения и общественного здоровья.

**ИНП РАН** - Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук (ИНП РАН) специализируется на выполнении фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований в области анализа и прогнозирования перспектив социально-экономического развития России и ее регионов

**НИИТФА** – центр проектирования и оптимизации оборудования для электронно-лучевых технологий. Головной разработчик технологических регламентов для установок электронно-лучевого модифицирования материалов, включая очистку газообразных, жидких и твердых отходов. Имеет собственное производственно-экспериментальное подразделение, а также источники электронных и электромагнитных пучков. Обладает обширным опытом в автоматизации технологических процессов и создании систем мониторинга технологических параметров. Целевые задачи в рамках программы – проектирование, экспертиза и регламентация процессов.

**МГУ** – флагман научных разработок и подготовки кадров в области физической химии и химии высоких энергий. Обладает обширным кадровым и приборным потенциалом, включая возможности Технологической долины МГУ. Разработчик новых методов и подходов в сфере электронно-лучевой конверсии материалов. Имеет богатейший опыт в аналитических исследованиях многокомпонентных растворов и смесей. Есть специализированная кафедра химии высоких энергий и лаборатории, разрабатывающие современные электронные ускорители. Задачи в рамках программы - аналитические исследования, экспериментальные разработки, подготовка и совершенствование научных специалистов по базовой тематике программы.

**РХТУ** – ведущий химико-технологический ВУЗ с широкой специализацией, включая ключевые области промышленной экологии и химии высоких энергий. Создатель высокоэффективных оригинальных химико-технологических процессов. Имеет Менделеевский инжиниринговый центр, инновационный научно-технологический центр «Долина Менделеева» и центр развития малотоннажной химии. В составе Университета действуют Кафедра ЮНЕСКО «Зелёная химия для устойчивого развития», Кафедра химии высоких энергий и радиоэкологии. Университет имеет более 120 партнерских договоров с вузами и организациями 35 стран дальнего зарубежья. Задачи в рамках программы - экспертно-аналитические исследования, натурное и математическое моделирование, подготовка инженерно-технологических кадров по базовой тематике программы.

Для обеспечения мирового уровня исследований на начальном этапе программы требуется разработка, создание и внедрение в научно-образовательную практику уникального научно-демонстрационного комплекса (установок, средств контроля и измерения, учебно-методических и информационных материалов) для электронно-лучевых исследований экологического назначения, что в частности предусматривает проведение модернизации или замены ряда устаревших приборов физико-химического анализа, прежде всего, лабораторного линейного ускорителя электронов, ЭПР-спектрометра, хроматомасс-спектрометра, ТОС-анализатора, УФ и ИК спектрометров, термогравиметра, высоковольтного источника электропитания.

Институты, задействованные в программе, относятся к числу крупнейших отечественных научных, научно-технологических и научно-производственных организаций, имеющих неоспоримый опыт в создании электронно-лучевых технологий и обладающих специализированным оборудованием. Потенциальные участники выполнения работ по программе имеют ведущих отечественных специалистов по экологии, электронно-лучевым

технологиям и электронно-лучевому оборудованию, способных решать задачи комплексной программы. ИПЭЭ обладает обширной системой филиалов, научных центров, лабораторий и биостанций, использующих весь комплекс передовых методов анализа и прогнозирования состояния окружающей среды, а также решения фундаментальных проблем охраны живой природы. В ИФХЭ, МГУ и РХТУ сосредоточено подавляющее большинство отечественных специалистов в области химии высоких энергий и электронно-лучевых технологий. Эти организации обладают несколькими десятками патентов на передовые безопасные способы электронно-лучевой обработки, соответствующие задачам программы. ИЯФ и НИИЭФА обладают профильными производственными мощностями и непосредственно осуществляют производство электронных ускорителей по заявкам заказчиков (преимущественно иностранных). Оборудование, используемое в этих институтах, пригодно для изготовления уникальных узлов и систем ускорителя. ИЯФ и НИИЭФА выпустили свыше 250 электронных ускорителей технологического назначения и еще больше ускорителей специального назначения (для досмотровых комплексов, медицины, дефектоскопии, ядерной физики и др.). НИИТФА ведет текущее проектирование электронно-лучевого оборудования, систем безопасности, управления и контроля, а также привязку ускорителей к действующим производствам. Все эти организации многократно сотрудничали в совместных отечественных и международных проектах по разработке электронно-лучевых технологий.

При создании ЭЛО установок, основным ценообразующим элементом является ускоритель. Затраты на все сопряженные элементы (реакционное оборудование, помещения, коммуникации, проектирование, пусконаладочные работы, накладные расходы и т.п.) прямо пропорциональны стоимости ускорителя (Козлов, Ю.Д., Путилов, А.В. *Технология использования ускорителей заряженных частиц в промышленности, медицине и сельском хозяйстве*. М. Энергоатомиздат. 1997 г. (Серия "Российские высокие технологии"); Woods, R.; Pikaev, A. *Applied Radiation Chemistry. Radiation Processing.*; Wiley: NY, 1994).

Основные расходы по программе также относятся к разработке и изготовлению новых типов ускорителей. Согласно формуле, используемой для прогнозирования цены ускорителей мощностью до 100 кВт ( $90 \times E \times \sqrt{N}$ , где  $E$  – энергия пучка, МэВ;  $N$  – мощность пучка, кВт), себестоимость 400 кВт ускорителя (1 МэВ) составляет \$1 800 000. Однако эта величина справедлива для случая серийного производства. В случае создания первой модели уникального ускорителя затраты неизбежно возрастают примерно вдвое из-за необходимости разработки и создания новой оснастки, нового специализированного помещения, нового стенда, новых деталей, новых коммуникаций, нового испытательного оборудования, а также необходимости дублирования систем и элементов и т.п. Более того, для практического применения энергию пучка целесообразно увеличить до 1.5 МэВ, что, согласно вышеуказанной формуле, увеличивает стоимость ускорителя в полтора раза. Более того, 400 кВт – минимальная целевая мощность, которая в программе должна быть существенно превышена. Исходя из мировой практики, создание новой модели ускорителя или принципиальная модернизация уже разработанного прототипа занимает от 1.5 до 2.5 лет.

В настоящей программе предусматривается разработка и создание двух уникальных мощных ускорителей и одного уникального мобильного ускорителя ( $\approx$ \$150 000). Минимальная себестоимость первых моделей высокомоощных ускорителей оценивается величиной \$5 500 000. Упаковка, транспортировка, монтаж и запуск ускорителей на технологической площадке составляют около 10-12% от их стоимости ( $\geq$  \$ 600 000). Ускорители должны размещаться в обогреваемых помещениях ( $\geq +4^\circ\text{C}$ ) и оснащаться защитными бункерами (кожухом в случае мобильного модуля, подъемными механизмами, системами вентиляции, дозиметрического контроля и др.) Строительство или подготовка такого помещения для одного стационарного ускорителя составляет 15-20% от его стоимости ( $\geq$  \$ 800 000). Общая стоимость работ по созданию и размещению ускорителей оценивается величиной \$ 3 400 000 в случае серийного производства и \$ 7 100 000 при создании первых моделей. В настоящей программе, с учетом имеющихся заделов, оптимальная стоимость

оценивается величиной 570 млн. руб. (при курсе 80 руб./\$). Неизбежные расходы связаны с проектированием подпучкового реакционного оборудования, его изготовлением, транспортировкой и монтажом. По опыту создания электронно-лучевых установок в других отраслях промышленности, затраты на проектирование и подпучковое оборудование пропорциональны мощности ускорителя (производительности), и составляют около ¼ от стоимости ускорителя (145 млн. руб.). К планируемым затратам относится разработка и изготовление узлов для сборки мобильного электронно-лучевого модуля на подвижном носителе (авто-, авиа-, ж/д и т.п.) – 125 млн. руб. С учетом имеющихся заделов, общие расходы на создание ускорителей, мобильного модуля и подпучкового реакционного оборудования оцениваются величиной 840 млн. руб. Указанные затраты включают в себя фонд заработной платы, накладные и прочие расходы, связанные с электронно-лучевым оборудованием.

Разработка, создание и внедрение в научно-образовательную практику уникального научного комплекса для электронно-лучевых исследований экологического назначения предусматривает оснащение приборами и анализаторами мирового уровня, включая исследовательский линейный ускоритель электронов (95 млн. руб.), ЭПР-спектрометр (12 млн. руб.), хроматомасс-спектрометр (14 млн. руб.), ТОС-анализатор (10 млн. руб.), УФ и ИК спектрометры (8 млн. руб.), термогравиметрический динамический анализатор (15 млн. руб.), высоковольтные источники электропитания (5 млн. руб.), высокоскоростной оптический регистратор быстропротекающих процессов (9 млн. руб.) и вспомогательное коммутирующее оборудование (15 млн. руб.). Это оборудование необходимо для регистрации и анализа нестабильных продуктов, пост-эффектов и обратимых реакций. Оно должно размещаться совместно, в едином комплексе, именно из-за нестабильности продуктов и эффектов. Для размещения данного оборудования требуется модернизировать помещения УНУ КРХИ ИФХЭ РАН, включая систему электропитания, вентиляции и биологической защиты (30 млн. руб.), а также расширить ассортимент реагентов и сред-носителей (7 млн. руб.). Общие затраты на оборудование центра – 230 млн. руб.

Фундаментальные и прикладные исследования (ИФХЭ, МГУ, РХТУ, ИПЭЭ, СПбФ ИОГен РАН, ЮФУ), связанные с токсико-экологическими вопросами и разработкой электронно-лучевых методов/технологий с использованием уникального научного комплекса для электронно-лучевых исследований экологического назначения будут проводиться профильными специалистами все время выполнения программы. Параллельно будет проводиться подготовка учебно-образовательных курсов для студентов, аспирантов, операторов ускорителей и вспомогательного персонала. Планируется, что в этой работе ежемесячно будет задействовано в среднем 25 специалистов с месячным фондом заработной платы и нормативных отчислений 100 тысяч руб./чел. (в сумме 300 млн. руб.). Учитывая неизбежность сложных координационно-организационных работ и дальних командировок, в программе предусматриваются соответствующие расходы в размере 20 % - 270 млн. рублей. Сумма накладных расходов на научно-исследовательскую, аналитическую и организационную работу (не включая изготовление ускорителей) составляет 160 млн. руб. Итого расходов по программе – 1 800 000 рублей.

Список участников может быть дополнительно оптимизирован на основе мнения экспертов.

#### **10. Предложения об источниках финансирования комплексной программы/комплексного проекта**

Для реализации КНТП предполагается разработка комплексной схемы софинансирования из средств как федерального бюджета, так и бюджетов субъектов РФ, местных бюджетов, а также внебюджетных источников.

Ниже приводится ориентировочный вариант возможного распределения средств.



№	Этапы реализации комплексной программы / комплексного проекта	Предполагаемые источники финансирования	Год реализации			Всего (млн. руб.)
			2023-2024	2024-2025	2025-2026	
1	Разработка технических требований к ключевому оборудованию. Комплектование научно-исследовательского комплекса.	1. Средства федерального бюджета	255			255
		2. Средства бюджетов субъектов Российской Федерации	4			4
		3. Средства местных бюджетов	0			0
		4. Внебюджетные источники	3			3
2	Разработка конструкции ускорителей и реакционного оборудования. Запуск научно-исследовательского комплекса.	1. Средства федерального бюджета		282		282
		2. Средства бюджетов субъектов Российской Федерации		0		0
		3. Средства местных бюджетов		0		0
		4. Внебюджетные источники		8		8
3	Комплектование и изготовление технологической оснастки и помещений для производства оборудования. Фундаментальные исследования.	1. Средства федерального бюджета			196	196
		2. Средства бюджетов субъектов Российской Федерации			0	0
		3. Средства местных бюджетов			0	0
		4. Внебюджетные источники			15	15
№	Этапы реализации комплексной программы / комплексного проекта	Предполагаемые источники финансирования	Год реализации			Всего (млн. руб.)
2026-2027	2027-2028	2028-2029				
4	Изготовление стационарных ускорителей. Прикладные исследования.	1. Средства федерального бюджета	283			283
		2. Средства бюджетов субъектов Российской Федерации	0			0
			0			0

		3. Средства местных бюджетов 4. Внебюджетные источники	27			27
5	Тестирование и оптимизация стационарных ускорителей. Изготовление оборудования для мобильного модуля. Разработка технологических регламентов.	1. Средства федерального бюджета 2. Средства бюджетов субъектов Российской Федерации 3. Средства местных бюджетов 4. Внебюджетные источники		204 22 2 75		204 22 2 75
6	Разработка решений по размещению оборудования. Подготовка монтажных систем. Экологические тесты.	1. Средства федерального бюджета 2. Средства бюджетов субъектов Российской Федерации 3. Средства местных бюджетов 4. Внебюджетные источники			11 36 24 75	11 36 24 75
№	Этапы реализации комплексной программы / комплексного проекта	Предполагаемые источники финансирования	Год реализации			Всего (млн. руб.)
			2029-2030	2030-2031	2031-2032	
7	Размещение, запуск и наладка оборудования. Пробные испытания на реальных средах.	1. Средства федерального бюджета 2. Средства бюджетов субъектов Российской Федерации 3. Средства местных бюджетов 4. Внебюджетные источники	42 18 0 36			42 18 0 36
8	Сопряжение электронно-лучевого и традиционного очистного оборудования. Испытание и приемка оборудования.	1. Средства федерального бюджета 2. Средства бюджетов субъектов Российской Федерации		55 16		55 16

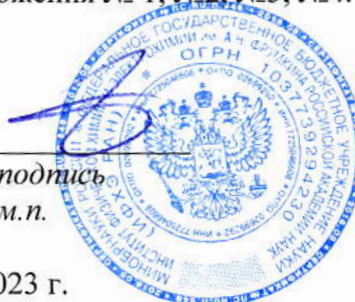
		3. Средства местных бюджетов		5		5
		4. Внебюджетные источники		20		20
9	Подготовка документации для серийного производства и внедрения. Популяризация технологии.	1. Средства федерального бюджета 2. Средства бюджетов субъектов Российской Федерации 3. Средства местных бюджетов 4. Внебюджетные источники			33 2 2 10	33 2 2 10
№	Этапы реализации комплексной программы / комплексного проекта	Предполагаемые источники финансирования	Год реализации			Всего (млн. руб.)
			2032-2033	2033-2034	2034-2035	
10	Авторский надзор за использованием технологии. Продвижение и оптимизация технологии.	1. Средства федерального бюджета 2. Средства бюджетов субъектов Российской Федерации 3. Средства местных бюджетов 4. Внебюджетные источники	20 9 0 10			20 9 0 10
Итого по бюджетным источникам всего:						1 521
в том числе:						
федеральный бюджет						1 381
бюджеты субъектов Российской Федерации						107
местные бюджеты						33
Итого по внебюджетным источникам:						279

**ВСЕГО****1 800 млн. руб.**

Составной частью заявки являются Приложения № 1, №2, №3, №4.

Директор ИФХЭ РАН  
член-корреспондент РАН,  
доктор химических наук

подпись  
м.п.

**А. К. Буряк**

ФИО

Дата составления заявки: «20» 04 2023 г.

## Приложение №1 к заявке на разработку

КНТП полного инновационного цикла «Разработка и внедрение в производство комплекса прорывных, безопасных для человека и природы электронно-лучевых технологий и технических средств обезвреживания отходов и аварийных техногенных выбросов»

**Фундаментальная и прикладная часть Программы, связанная с экологией, заключается в проведении исследовательских работ по следующим направлениям.**

(1)

(ФБГУН СПбФ Институт Общей Генетики им. Н.И. Вавилова Санкт-Петербургский филиал)

Проблема генетической безопасности человека приобретает все большую актуальность в связи с появлением новых факторов риска, способных повреждать генетический материал соматических и половых клеток, и индуцирующих развитие онкологических, наследственных и других заболеваний. К числу таких факторов относят, разнообразные химические и физические агенты окружающей среды, ионы тяжёлых металлов, новые лекарственные препараты, пищевые добавки, компоненты косметических средств и средств бытовой химии, а также эндогенные факторы, такие как продукты метаболизма и активные формы кислорода. Одним из опасных накопителей патогенных микроорганизмов и мутагенных веществ являются сточные воды. Для своевременного предотвращения возможного негативного влияния химических веществ на генетический аппарат клеток человека необходимо разрабатывать и применять новые технологии, позволяющие устранять опасные патогены и проводить анализ их генетической активности. С этой целью были разработаны и применяются батареи тестов, позволяющие выявлять мутагены и канцерогены. В России обязательному тестированию на мутагенную активность подлежат новые оригинальные фармакологические средства, созданные химическими, биотехнологическими, генноинженерными и иными способами. Эта работа предусматривает оценку способности лекарственных средств к индукции разных типов мутаций с помощью комплекса методов на разных тест-объектах. Чаще всего на стадии доклинических испытаний применяют следующие тесты: тест Эймса, учет аберраций хромосом в клетках костного мозга млекопитающих, учет микроядер в клетках млекопитающих, учет рецессивных, сцепленных с полом, летальных мутаций у дрозофилы и учет соматической рекомбинации (мозаицизма) у дрозофилы. Перед второй фазой клинических испытаний проводят изучение способности лекарственного препарата индуцировать мутации в зародышевых клетках мышей (тест на доминантные летали).

В представленном проекте планируется оценить эффект электронно-лучевой обработки на уровень мутагенной активности сточных вод. Использование ускорителя для очистки воды должно приводить к уничтожению микроорганизмов и снижению мутагенной активности химических соединений. Электронно-лучевая обработка способствует получению свободных радикалов. Сами по себе свободные радикалы являются активными мутагенами, однако они нестабильны и сразу после возникновения взаимодействуют с разнообразными химическими соединениями, что способствует образованию более стабильных веществ. Сравнительный анализ мутагенной активности сточных вод до и после электронно-лучевой обработки позволит оценить эффективность и безопасность предложенной технологии для здоровья человека. В качестве негативного контроля в работе будут использованы образцы чистой дистиллированной воды, а в качестве позитивного контроля образцы дистиллированной воды с добавлением эталонных мутагенов.

Планируется использовать два подхода – тест Эймса и «Альфа-тест» разработанный и успешно апробированный на кафедре генетики и биотехнологии СПбГУ.

Тест Эймса входит в стандартную линейку тестов одобренных ГОСТ, используемых для оценки мутагенной активности лекарственных веществ. Он позволяет сравнительно быстро проанализировать большое число образцов. Сущность метода заключается в регистрации способности испытуемого соединения или его метаболитов индуцировать у индикаторных штаммов бактерий *Salmonella typhimurium*, ауксотрофных по гистидину, реверсии к прототрофности (Goyal et al., 2022. Environ Sci Pollut Res., doi.org/10.1007/s11356-021-15442-9).

Штаммы бактерий, используемые в тесте Эймса, несут различные типы точечных мутаций - замены оснований или мутации сдвига рамки считывания. Возвратные точечные мутации, возникающие под действием мутагенов, обеспечивают способность клонов расти на среде без гистидина. В данном тесте появляется возможность не только выявлять мутагенность исследуемых веществ, но и изучать механизм их мутагенного действия. Ещё одной особенностью теста Эймса является возможность использования предварительной метаболической активации тестируемого соединения путем его обработки экстрактом из печени крыс. Препараты микросом печени содержат ферменты (цитохромы P450), которые способны превращать некоторые потенциально мутагенные вещества (промутагены) в мутагены (Ames et al., 1973; Maron and Ames, 1982). Вместе с тем тест Эймса имеет ограничения – в этом тесте детектируются лишь точечные мутации, тогда как события, приводящие к хромосомным перестройкам, не регистрируются.

В лаборатории Физиологической генетики СПбГУ под руководством академика С.Г. Инге-Вечтомова разработан уникальный тест, позволяющий детектировать как точечные мутации так и любые типы хромосомных перестроек в клетках дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* (Inge-Vechtomov et al., Genome. 1989;doi.org/10.1139/g89-097; Stepchenkova et al., Genetics, 2021; doi.org/10.1093/genetics/iyab060). Более того, уникальность данной тест системы заключается в том, что Альфа-тест позволяет учитывать даже предмутационные изменения последовательности ДНК, которые в ходе клеточного цикла могут быть исправлены системой репарации. В качестве модельного объекта в предлагаемом тесте используют два штамма дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, имеющих тип спаривания альфа, поэтому тест получил название – альфа-тест. Гаплоидные штаммы дрожжей могут иметь один из двух типов спаривания «а» или «альфа». В норме возможна гибридизация клеток только противоположных типов спаривания а и альфа, при этом образуются диплоидные гибриды, не способные к дальнейшему скрещиванию. В редких случаях с частотой  $10^{-5}$  возможна гибридизация клеток одинакового типа спаривания, которая возрастает при воздействии генотоксических факторов. Такая гибридизация возможна, если одна из клеток изменила тип спаривания с альфа на а. Именно изменение частоты переключения типа спаривания дрожжевых клеток с альфа на а является показателем генетической нестабильности в альфа-тесте. Каждое событие переключения типа спаривания может быть учтено по росту клонов на селективной среде. В альфа-тесте используют два различных штамма одинакового (альфа) типа спаривания смешивают на селективной среде, на которой могут расти только «незаконные» гибриды, но не родительские штаммы. Один из гаплоидных штаммов предварительно обрабатывают потенциальным мутагеном. Такая «незаконная» гибридизация возможна, когда одна из копулирующих клеток временно или необратимо меняет свой тип спаривания с альфа на а. Незаконное переключение типа спаривания может быть вызвано различными нарушениями, затрагивающими локус типа спаривания *MATa*, который находится в правом плече хромосомы III: точечными мутациями, потерей правого плеча хромосомы III, потерей всей хромосомы III, а также рекомбинационными событиями. Предмутационные изменения, которые вызывают лишь временное нарушение экспрессии локуса *MATa* до их исправления системой репарации, также приводят к незаконной гибридизации и могут быть учтены в данном тесте.

Таким образом, использование Альфа-теста позволяет детектировать все типы предмутационных и мутационных событий в эукариотических клетках.

План работы по оценке эффекта электронно-лучевой обработки на уровень мутагенной активности сточных вод с помощью теста Эймса включает следующее:

К клеткам бактерий *Salmonella typhimurium* будет предварительно добавлен коммерчески доступный экстракт печени для активации мутагенов.

Клетки *Salmonella typhimurium* будут высеваться на чашки с твердой средой без гистидина. В верхний агар будет добавлена 1/10 объема а) сточной воды после электронно-лучевой обработки; б) сточной воды до электронно-лучевой обработки; в) чистой воды (негативный контроль); г) чистой воды с добавлением эталонного мутагена метилметан сульфата (позитивный контроль). Образцы сточной воды до и после электронно-лучевой обработки будут добавлены в питательную среду для культивирования штаммов *Salmonella typhimurium*. К клеткам бактерий будет предварительно добавлен коммерчески доступный экстракт печени.

Для каждого варианта экспериментальных условий, а также контрольных вариантов будет использовано три повторности. Затем будет подсчитано количество выросших колоний ревертантов на каждой чашке Петри. Будут определены среднее количество колоний ревертантов и стандартная ошибка среднего для каждого варианта экспериментальных условий и определена статистическая значимость отличий. По результатам статистической обработки результатов будут сделаны выводы о мутагенной активности исследуемых проб.

Оценка эффекта электронно-лучевой обработки на уровень мутагенной активности сточных вод с помощью Альфа теста включает:

1. В работе будут использованы два штамма дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* альфа типа спаривания, несущие комплементарные генетические маркеры для отбора гибридов и генетические маркеры хромосомы III. Клетки одного из штаммов будут предварительно выращиваться в жидкой среде, содержащей один из образцов воды: (а) сточной воды после электронно-лучевой обработки; б) сточной воды до электронно-лучевой обработки; в) чистой воды (негативный контроль); г) чистой воды с добавлением мутагена метилметан сульфата (позитивный контроль). Клетки второго штамма будут выращиваться в жидкой среде, содержащей чистую воду. 2. Клетки обоих штаммов будут высеваться совместно на селективную среду, на которой могут расти только гибриды, возникшие в результате незаконной гибридизации. 3. Во всех образцах будет подсчитано количество выросших колоний. Для каждого варианта эксперимента будет использовано не менее шести повторностей, будут определены медиана и доверительный интервал. С использованием непараметрического критерия Манна-Уитни будет определена статистическая значимость отличий. По результатам статистической обработки результатов будут сделаны выводы о мутагенной активности исследуемых проб.

Результаты, полученные в тесте Эймса и в Альфа-тесте позволят оценить влияние электронно-лучевой обработки на уровень мутагенной активности сточных вод. Оценка эффекта электронно-лучевой обработки на уровень мутагенной активности сточных вод будет проводиться на всех этапах испытания опытных и промышленных образцов. Разработка рекомендаций по оценке мутагенной активности сточных вод после электронно-лучевой обработки займёт 1 год на завершающем этапе исследования.

(2)

(АБиБ ЮФУ, «Южный федеральный университет», Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского)

Устойчивость к противомикробным препаратам является серьёзной проблемой общественного здравоохранения во всём мире. Широкое и всё более растущее использование антибиотиков и других противомикробных препаратов в медицине, ветеринарии, животноводстве, растениеводстве и в быту увеличило разнообразие и распространение антибиотикорезистентных бактерий (АРБ) и генов резистентности к антибиотикам (АРГ). Риски для здравоохранения значительно возрастают, когда бактерии приобретают множественную устойчивость к антибиотикам, что делает лечение таких инфекций особенно затруднительным.

В настоящее время АРГ считаются новым классом загрязнителей окружающей среды. Загрязнение антропогенными отходами рассматривается в качестве основного фактора, способствующего распространению АРГ. Муниципальные очистные сооружения сточных вод (ОС) являются одним из наиболее важных источников поступления АРГ в окружающую среду. Одновременное присутствие на ОС АРБ, остаточных количеств антибиотиков, других поллютантов и селективных факторов, богатого запаса питательных веществ и возможность тесного межклеточного взаимодействия способствуют горизонтальному переносу генов (ГПГ) резистентности к антибиотикам. Органические поллютанты и тяжелые металлы в значительных количествах присутствуют в сточных водах и являются факторами, усиливающими ГПГ, а следовательно, и распространение АРГ в микробных сообществах.

Для оценки биологической эффективности и экологической безопасности электронно-лучевой обработки сточных вод необходимо провести сравнительный анализ структуры

микробного сообщества, количества и состава генов антибиотикорезистентности (резистома) микробиома сточных вод до и после очистки с использованием ЭЛО. Кроме того, для оценки эффективности очистки, эти же параметры должны быть определены в стоках, очищенных с помощью применяемого в настоящее время метода.

**Для оценки биологической эффективности очистки сточных вод** планируется провести анализ изменения таксономического состава микробного сообщества на основе метабаркодирования – секвенирования ампликонов переменных участков генов 16S рибосомальной РНК. Полученный массив данных секвенирования, при сравнении полученных последовательностей с содержащимися в генетической базе данных GenBank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>), позволит определить качественный и количественный таксономический состав бактерий и архей исследуемого микробиома. При анализе таксономической структуры микробиома на уровне рода можно идентифицировать присутствие в пробах санитарно-значимых патогенных/условно патогенных микроорганизмов.

Определение всей совокупности генов резистентности к антибиотикам (резистома) микроорганизмов в исследуемых образцах планируется осуществить при помощи полного высокопроизводительного метагеномного секвенирования (шот-ган). Гены антибиотикорезистентности также будут определены путем поиска гомологичных последовательностей в базе GenBank. После определения состава резистома сточных вод будут отобраны АРГ, наиболее значимые с клинической точки зрения. Текущий качественный и количественный контроль присутствия выбранных АРГ планируется проводить при помощи ПЦР в реальном времени.

**Для оценки токсичности сточных вод** планируется использовать биотестирование с применением цельноклеточных бактериальных люминесцентных сенсоров. У биолюминесцентных бактериальных сенсоров в качестве репортеров используются гены бактериальных люцифераз.

Для тестирования химических примесей (токсикантов) в воде, почве, пищевых продуктах, воздухе и др. биотесты на основе биолюминесцентных бактерий в настоящее время используются в двух вариантах:

- 1) основанном на тушении биолюминесценции токсикантом - это системы с конститутивной экспрессией;
- 2) основанном на индукции (усилении) интенсивности биолюминесценции токсикантом - системы с индуцируемой экспрессией.

*Бактерии первой группы с конститутивной экспрессией* обычно имеют высокую степень экспрессии люминесценции, которая уменьшается в токсических условиях («lights off»). Обычно это природные биолюминесцентные бактерии, такие как *Aliivibrio fischeri*. Их ответ не специфичен, то есть они реагируют на комплекс всех присутствующих токсичных веществ. В работе таких биосенсоров задействован механизм ингибирующего действия ядовитых веществ на метаболизм клетки, в основном, на дыхательную цепь, что опосредованно влияет на люциферазную реакцию, вызывая ослабление интенсивности биолюминесценции суспензии клеток

*Специфические индуцируемые тест-системы*, напротив, имеют низкий уровень базовой люминесценции, которая увеличивается после контакта с конкретным соединением («lights on»). В таких биосенсорах промотор и репортерные гены вставлены из других бактерий и дают оптимальный ответ на соединения, представляющие интерес. В этой группе методик, основанных на индукции биолюминесценции клеток при воздействии токсиканта, используются различные варианты специфических регуляторных элементов, которые были выработаны бактериями в процессе эволюции. Эти биосенсоры с высокой степенью специфичности реагируют на наличие в среде того или другого химического вещества и характеризуются высокой чувствительностью. Это обеспечивается особенностью взаимодействия белка-рецептора (репрессора) с химическим соединением. В результате их использования появляется возможность более детально оценить механизм действия токсического агента на клетку и определить молекулярную мишень в клетке, которую повреждает токсикант.

Кроме интегральной токсичности стоков, наличия веществ, повреждающих белки и мембраны, определяются вещества, вызывающие окислительный стресс (супероксидный и пероксидный), что реализуется с помощью биосенсоров.

В зависимости от используемых промоторов, «lights on»- биорепортеры можно разделить на эффект- и вещество-специфичные штаммы (или же широко- и узко-специфичные). Первые реагируют на определенный тип токсичности, например, на повреждение ДНК; окислительный стресс; или повреждения белков (тепловой шок), мембран. Второй тип штаммов обнаруживает одно соединение или группу соединений со схожими химическими характеристиками или образом действий, такие как металлы, алканы, бензол, толуол, этилбензол, ксилол и др.

Лаборатория экологии и молекулярной биологии микроорганизмов Академии Биологии и Биотехнологии ЮФУ имеет значительный задел в исследовании распространения генов антибиотикорезистентности в природных экосистемах и сточных водах под влиянием поллютантов, исследовании структуры микробных сообществ и экотоксикологической оценки сред при помощи цельноклеточных бактериальных lux-биосенсоров:

1. Sazykina M., Barabashin T., Konstantinova E., Al-Rammahi A.A.K., Pavlenko L., Khmelevtsova L., Karchava Sh., Klimova M., Mkhitaryan I., Khammami M., Sazykin I., Non-corresponding contaminants in marine surface sediments as a factor of ARGs spread in the Sea of Azov, Marine Pollution Bulletin, Volume 184, 2022, 114196, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114196>.
2. Azhogina T, Sazykina M, Konstantinova E, Khmelevtsova L, Minkina T, Antonenko E, Sushkova S, Khammami M, Mandzhieva S, Sazykin I. Bioaccessible PAH influence on distribution of antibiotic resistance genes and soil toxicity of different types of land use // Environ Sci Pollut Res. - 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23028-2>
3. Khmelevtsova L.E., Sazykin I.S., Azhogina T.N., Sazykina M.A. Influence of Agricultural Practices on Bacterial Community of Cultivated Soils. *Agriculture*. 2022; 12(3):371. <https://doi.org/10.3390/agriculture12030371>
4. Sazykina M.A., Minkina T.M., Konstantinova E.Yu., Khmelevtsova L.E., Azhogina T.N., Antonenko E.M., Karchava Sh.K., Klimova M.V., Sushkova S.N., Polienko E.A., Birukova O.A., Mandzhieva S.S., Kudrevskaya E.M., Khammami M.I., Rakin A.V., Sazykin I.S. Pollution impact on microbial communities composition in natural and anthropogenically modified soils of Southern Russia // Microbiological Research. - 2022, Vol. 254, 126913, ISSN 0944-5013, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126913>.
5. Sazykin I.S., Minkina T.M., Khmelevtsova L.E., Antonenko E.M., Azhogina T.N., Dudnikova T.S., Sushkova S.N., Klimova M.V., Karchava Sh.K., Seliverstova E.Yu., Kudrevskaya E.M., Konstantinova E.Yu., Khammami M.I., Gnennaya N.V., Al-Rammahi A.A.K., Rakin A.V., Sazykina M.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons, antibiotic resistance genes, toxicity in the exposed to anthropogenic pressure soils of the Southern Russia // Environmental Research. 2021, Vol. 194, 110715. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110715>
6. Сазыкин И.С., Хмелевцова Л.Е., Селиверстова Е.Ю., Сазыкина М.А. Влияние использования антибиотиков в животноводстве на распространение лекарственной устойчивости бактерий // Прикладная биохимия и микробиология. - 2021. - Т. 57. - № 1. - С. 24-35. - DOI: 10.31857/S0555109921010335  
Sazykin I.S., Khmelevtsova L.E., Azhogina T.N., Sazykina M.A. Influence of antibiotics use in animal breeding on dissemination of bacterial drug resistance // Appl. Biochem. Microbiol. – 2021. - <https://doi.org/10.1134/S0003683821010166>
7. Сазыкин И.С., Ажогина Т.Н., Хмелевцова Л.Е., Хаммами М.И., Сазыкина М.А. Роль очистных сооружений сточных вод в распространении генов резистентности к антибиотикам // Теоретическая и прикладная экология. – 2020. – № 4. – С. 250-257. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-250-257  
Sazykin I.S., Azhogina T.N., Khmelevtsova L.E., Khammami M.I., Sazykina M.A. Role of wastewater treatment plants in distribution of antibiotic resistance genes// Theoretical and Applied Ecology. 2020. - V. 4. – P. 250-257. - doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-250-257



8. Khmelevtsova L.E., Sazykin I.S., Azhogina T.N., Sazykina M.A. The dissemination of antibiotic resistance in various environmental objects (Russia). // *Environmental Science and Pollution Research* - 2020. - 27(35). - P. 43569-43581. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10231-2>
9. Сазыкин И.С., Селиверстова Е.Ю., Хмелевцова Л.Е., Ажогина Т.Н., Кудеевская Е.М., Хаммами М.И., Гненная Н.В., Аль-Раммахи А.А.К., Ракин А.В., Сазыкина М.А. Гены устойчивости к антибиотикам в сточных водах г. Ростова-на-Дону и нижнем течении р. Дон // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2019. – Т. 4. – С. 66-72.  
Sazykin I.S., Seliverstova E.Yu., Khmelevtsova L.E., Azhogina T.N., Kudeevskaya E.M., Khammami M.I., Gnennaya N.V., Al-Rammahi A.A.K., Rakin A.V, Sazykina M.A. Occurrence of antibiotic resistance genes in sewages of Rostov-on-Don and lower Don River // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. V. 4. – P. 76-82. doi:10.25750/1995-4301-2019-4-076-082
10. Gorovtsov A.V., Sazykin I.S., Sazykina M.A. The influence of heavy metals, polyaromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls pollution on the development of antibiotic resistance in soils // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. V. 25 (10). P. 9283–9292 <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1465-9>
11. Sazykin I.S., Sazykina M.A., Khmelevtsova L.E., Mirina E.A, Kudeevskaya E.M., Rogulin E.A., Rakin A.V. Biosensor-based comparison of the ecotoxicological contamination of the wastewaters of Southern Russia and Southern Germany // *International Journal of Environmental Science and Technology* 2016. – V. 13. - №3. - P. 945-954. - DOI 10.1007/s13762-016-0936-0.
12. Sazykin I.S., Sazykina M.A., Khammami M.I., Khmelevtsova L.E. Kostina N.V., Trubnik R.G. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of lower reaches of the Don River (Russia) and their ecotoxicologic assessment by bacterial lux-biosensors // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2015. - V. 187(5):4406. DOI:10.1007/s10661-015-4406-9
13. Сазыкина М.А., Чистяков В.А., Сазыкин И.С. Генотоксичность донных отложений р. Дон (2001-2007 гг.) // *Водные ресурсы*. 2012. Т. 39, № 1. С. 92-98. IF WoS 0.27/0.415  
Sazykina M.A., Chistyakov V.A., Sazykin I.S. Genotoxicity of Don River bottom sediments (2001-2007) // *Water Resources*. – 2012. - V. 39. - №. - P. 118-124. DOI: 10.1134/S0097807811060169

(3)

*(ИПЭЭ, Институт Проблем Экологии и Эволюции им. А.Н. Северцова РАН)*

Современные достижения в области рационального природопользования позволяют совмещать динамичное расширение промышленных мощностей с сохранением нормального функционирования и биологического разнообразия природных или умеренно трансформированных человеческой деятельностью экосистем. Критически важным условием (и одним из критериев) рационального природопользования служит соблюдение предельных норм загрязнений (химического, термического, радиационного и др.). Одним из наиболее чутких индикаторов превышения этих норм являются пресноводные организмы. Результатом загрязнений водоемов может быть как снижение численности и биоразнообразия биоты, так и резкое увеличение обилия инвазивных или вредоносных видов, например, токсичных микроводорослей.

Методы контроля качества воды подробно разработаны и стандартизированы (напр. ГОСТ 17.1.3.07-82), однако новые подходы к сохранению биологического разнообразия, распространение инвазивных видов, появление новых инфекций, а также разработка в последние десятилетия новых аналитических методик привело к радикальному изменению в подходах к экологическому мониторингу промышленных объектов в мире. Анализ зарубежного опыта позволяет рекомендовать к разработке и пилотному использованию **методику оценки воздействия на окружающую среду путем исследования средовой ДНК (eDNA)**. Средовая ДНК представляет собой взвешенные в воде фрагменты генетического материала организмов, постоянно или временно населяющих водоем, а также поступающего из прибрежных экосистем. Оценка состава и обилия eDNA позволяет объективно оценить общее биоразнообразие и обилие индикаторных видов. Более того, в зависимости от задач, объемов и подробности анализа, средовая ДНК дает возможность получить информацию о состоянии биоты не только водных, но

и наземных экосистем в пределах водосбора исследуемого водоема. Чувствительность уже имеющихся методов анализа средовой ДНК позволяет, при наличии постоянного мониторинга, решать прикладные и фундаментальные научные задачи, далеко выходящие за пределы стандартного контроля состояния среды. Задача исследований может быть разделена на две составляющие:

1) оценка качества очищенных вод на основе анализа средовой РНК и ДНК с целью выбора наиболее оптимального режима использования ЭЛО установки для деградации средовой РНК и ДНК (бактерии, вирусы, одноклеточные паразиты);

2) оценка экотоксичности загрязненных стоками, депонированным иловым осадком, ТБО воды, воздуха, почвы и на ее основе исследование эффекта биоаккумуляции, в результате длительного нахождения человека в условиях малых субтоксичных доз, то есть, когда объем вредного вещества в окружающей среде ниже норматива, а в живом организме происходит накопление до токсичного уровня.

### **Оценка качества очищенных вод на основе анализа средовой РНК и ДНК – нуклеиновых кислот, содержащихся в воде (eRNA/eDNA)**

Метод основан на анализе фрагментов РНК и ДНК патогенов, содержащихся в водной среде (Rey et al., 2019; Amarasiri et al., 2021). Обитающие в водоемах организмы постоянно выделяют ДНК и РНК в водную среду. Такие нуклеиновые кислоты (НК) называют средовой ДНК/РНК (environmental RNA/DNA). Длительность сохранности НК в природных водоемах определяется множеством абиотических и биотических факторов, достигая нескольких дней, недель и даже месяцев – в зависимости от сложившихся условий деградации НК в водоеме (Beng & Corlett, 2020; Zhao et al., 2021). При фильтровании воды можно получить выборку средовой ДНК/РНК, по которой можно оценить концентрацию и степень деградации нуклеиновых кислот, а также выполнить идентификацию присутствующих в пробе вирусных, бактериальных и протозойных патогенов с определением их количественной представленности применяя высокопроизводительное секвенирование методом метабаркодинга.

Оценка эффективности очистки водной среды состоит из двух этапов.

1. Экспериментальная проверка эффективности разрушения/деградации ДНК/РНК водных организмов. Производится тестирование экспериментальных (после очистки) и контрольных (без очистки) проб воды, взятых одномоментно из одного источника (сточные или загрязненные воды). Пробы воды (как экспериментальной, так и контрольной) отфильтровываются через специальный фильтр, задерживающий частицы ДНК/РНК, содержащиеся в воде. После чего выделяется тотальная ДНК и тотальная РНК и производится анализ длин фрагментов НК из проб воды, подвергшихся облучению и без такового (контроль) в биоанализаторе ДНК/РНК. По типу профиля длин фрагментов можно судить об эффективности деградации ДНК в результате обработки вод инновационным прибором. Существенное укорочение длин фрагментов будет говорить об успешной деградации молекул ДНК/РНК. Современные биоанализаторы типа Agilent TapeStation позволяют установить длины фрагментов в диапазоне 35-60000 пар нуклеотидов. Возможны также определения концентрации ДНК и РНК определенных длин фрагментов.

2. Качественно-количественный анализ РНК и ДНК в воде после очистки в инновационной установке с применением метода метабаркодинга (Rupert et al., 2019; Vilaça et al., 2020) и высокопроизводительного секвенирования. Выделенные пробы ДНК (и кДНК-последовательности, полученные от РНК-вирусов) амплифицируют с применением универсальных пар праймеров, фланкирующих баркодовые последовательности выбранных групп организмов (например, гена 16S рибосомальной РНК в случае бактерий). Из полученных ампликонов составляются ДНК-библиотеки с уникальными для каждой пробы баркодами для индивидуальной идентификации проб. После проверки качества ДНК-библиотек в биоанализаторе, успешные библиотеки секвенируются при помощи секвенаторов нового поколения типа Illumina. После получения значительного массива отсеквенированных данных при

помощи биоинформационной обработки производится фильтрация данных и генетическая идентификация организмов путем сравнения полученных последовательностей баркодовых фрагментов ДНК с таковыми в глобальной базе данных GenBank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>). Метод позволяет произвести идентификацию конкретных патогенов и оценить их количественную представленность в пробах (Gomes et al., 2017; Amarisiri et al., 2021). Это позволит проверить – нет ли различий в устойчивости каких-либо групп патогенов (вирусы, бактерии, протозойные паразиты) к применяемым параметрам облучения.

Представляется методически обоснованным провести серию повторных экспериментов по воздействию на очищаемую воду при разных режимах работы прибора (токовые или иные физические характеристики), длительности экспозиции, а также проведения экспозиции в разных объемах воды и с разным уровнем загрязненности) с целью выбора наиболее оптимального режима использования ЭЛО установки для деградации средней РНК (вирусы) и ДНК (вирусы, бактерии и одноклеточные паразиты).

(4)

*(ИПЭЭ РАН, Центр безопасности биосистем. Общая токсикология)*

С социальной точки зрения необходимо выявить/определить степень угрозы здоровью населения, длительно находящегося/ проживающего в условиях воздействия малых субтоксичных доз, прежде всего это селитебные территории, прилегающие к очистным сооружениям, промышленным, сельскохозяйственным предприятиям, (два крупнейших очистных находятся в черте г. Москвы) в результате чего возникают эффекты хронической экотоксичности, парадоксальной токсичности, временно компенсированной патологии. Воздействие экополлютантов создает среду вирусных инфекций, вызванных общим иммуносупрессивным действием на человека.

Аналитическая база обоснования вышесказанного не сформирована. Такая аналитическая база даст возможность : (1) разработки новых нормативов, реально отражающих безопасность среды, и (2) обозначит необходимость и обоснованность разработки и внедрения новых прорывных технологий очистки, основанных на принципах Химии и Физики Высоких Энергий – принципиально новый подход в решении экологических проблем, и (3) создаст условия востребованности данных технологий в экономическом секторе.

Следует также признать, что нормативы не решают всех проблем. Контроль безопасности жизни человека должен основываться на других принципах.

Исследования в области негативного воздействия окружающей среды именно на организм человека не проводились из-за недостаточной степени разработанности эко-токсикометрии – методические приёмы, позволяющие оценить перспективно и ретроспективно экотоксичность загрязнителей. Сложность анализа дозовых зависимостей экологических систем надорганизменного уровня (т.е. населения) связана с практической **нереализуемостью эксперимента** с дозируемыми нагрузками на природные биоценозы. Сбросы/выбросы (стоки ОС) реальных источников загрязнения многокомпонентны, не всегда можно выделить ведущие токсиканты. Сейчас Роспотребнадзор (главный контролирующий орган) пользуется методиками, основанными на принципе доза-эффект, что крайне недостаточно для определения опасности состоянию здоровья населения от недостаточно качественной работы очистных сооружений. Главное – накопительный эффект от загрязнений. В рамках КНТП предлагается провести исследовательские работы по биоаккумуляции.

#### **Оценка экотоксичности загрязненных диоксинами почв в местах прошлого сброса сточных вод.**

Возможность образования стойких высокотоксичных канцерогенных загрязнителей в сточных водах при их хлорировании твердо доказана. Самыми опасными среди них являются полихлорированные дибензо-п-диоксины и дибензофураны (ПХДД/Ф или диоксины) [1]. Последствия опосредованного средой длительного хронического воздействия на организм малых субтоксичных доз этих веществ могут проявляться активным ростом уровня встречаемости

различных форм экологозависимых заболеваний и, как следствие, снижением темпов социально-экономического развития [2, 3]. В России метод хлорирования сточных вод активно применяли до конца 80-х годов прошлого столетия, а опасность накопленных при этом канцерогенов никогда не оценивали.

Предел токсичности для диоксинов пока не определен [2-4]. Созданный и апробированный комплекс методов оценки экотоксичности загрязненных диоксинами территорий (прежде всего почв) по показателям привнесенного этими веществами риска здоровью населения основан на биомониторинге воздействия этих веществ на организм (*биомониторинг воздействия*) во взаимосвязи с возникающими при этом начальными токсическими эффектами (*биомониторинг эффектов*). Модельными объектами для биомониторинга стали мелкие млекопитающие из природных популяций (на примере рыжей полевки *Myodes glareolus*), т.к. экологические и биологические их особенности позволяют изучать и оценивать изменения причинно-следственных связей между мерами прямого действия диоксинов на организм и возникающими при этом токсическими эффектами в реальном масштабе времени в нескольких последовательных поколениях при максимально жесткой экспозиции [5, 6].

В качестве показателей прямого действия обоснованы величины концентраций токсичных для человека конгенов диоксинов (7 ПХДД и 10 ПХДФ) в тканях животных. Для оценки опасности их комбинированного и сочетанного действия обоснованы характеристики начальных токсических эффектов, отражающие запуск механизмов формирования и развития токсического процесса в условиях эмергентного взаимодействия [2, 3, 7].

Практическую ценность созданного алгоритма методов определяют перспективы решения задач по предупреждению негативного влияния диоксинов, загрязняющих среду, на человека путем наблюдения и контроля за вызываемыми этими веществами изменениями экотоксичности почв и среды обитания в целом. Дискретный характер взаимоотношений человека с экотоксикантами предполагает существенно меньшие уровни загрязнения его организма по сравнению с животными - обитателями аналогично загрязненных территорий. Поэтому результаты измерения содержания диоксинов в тканях животных и вызываемые этими веществами токсические эффекты следует рассматривать как сигнал о перспективах накопления сопоставимых уровней содержания диоксинов в тканях человека в случае очевидного бездействия.

*Методическая база биомониторинга воздействия* диоксинов уже создана и апробирована (Патент №2743498). Формула изобретения - способ оценки загрязнения окружающей среды диоксинами путем биомониторинга, отличающийся тем, что в качестве объекта биомониторинга используют рыжую полевку летнего и зимнего сезона, осуществляют в заданный период времени пробоотбор целых тушек животных для трех проб, причем каждая проба содержит не менее 3 тушек особей рыжей полевки, и определяют в них методом хромато-масс-спектрометрии высокого разрешения наличие высокотоксичных для человека конгенов диоксинов, при этом загрязненность региона определяют по разнице - превышению концентраций в пробах тушек рыжей полевки летнего сезона, отобранных в период года - августе, относительно условно-фоновых значений диоксинов в пробах тушек рыжей полевки зимнего сезона, отобранных в период после схода снежного покрова.

Диагностическую ценность *Методической базы биомониторинга эффектов* определяет впервые обоснованный спектр характеристик экспрессии генов (по уровню транскрипции), отражающих как строго специфические реакции в отношении диоксинов (AhR), так и менее специфические: течение процессов биотрансформации ксенобиотиков (CYP1A2); иммунные и метаболические ответы на сопутствующие стрессовые воздействия (Keap1); реакции на уровне генов эпигенетической регуляции (DNMT). Модификационную активность этих генов и влияние на стабильность генома оценивают по взаимосвязи показателей транскрипции ряда мобильных генетических элементов (ретротранспозонов) и характеристик экспрессии генов-регуляторов (ДНК-метилтрансфераз). Совокупность получаемых показателей реактивности генов (уровни их экспрессии) и их изменения у обследуемых полевок на фоне локального присутствия экотоксикантов свидетельствуют о начальных проявлениях вызываемых этими соединениями эффектов.

Безопасность Электронно-лучевых технологий (ЭЛО) определена соответствием действующим нормам радиационной безопасности (такие сертификаты безопасности выдаются на ускорители электронов).

ИТОГ: Подбор оптимальных режимов очистки сточных вод при помощи ЭЛО. Метагеномный контроль таксономического состава, резистома, содержания патогенов/условных патогенов микробного сообщества стоков до и после очистки. Оценка токсичности сточных вод до и после очистки.

Испытание пилотной установки в условиях, приближенных к промышленному использованию, контроль и оценка химических, микробиологических, токсикологических параметров и опасности для населения сточных вод до и после очистки.

Испытания промышленной установки в условиях реальной эксплуатации, контроль и оценка химических, микробиологических, токсикологических параметров и опасности для населения сточных вод до и после очистки.

Разработка стандартизированной методологии оценки биогенной и техногенной угрозы здоровью человека, окружающей среде, вызываемой недостаточной степенью очистки и обеззараживания стоков, газовыбросов, илового осадка.

Осуществление прорывной инфраструктурной и технологической модернизации систем очистки и обеззараживания сточных вод (промышленных/сельскохозяйственных/коммунальных) на основе принципов химии и физики высоких энергий, прежде всего электронно-лучевой обработки (ЭЛО) и комбинированных методов для обеспечения радикального снижения негативной химической и биохимической нагрузки на население и окружающую среду

Создание условий формирования и развития экологического образования нового уровня, дополненного научными разработками.

Передача разработанных методов контроля качества сточных вод после ЭЛО очистки подразделениям Роспотребнадзора. Текущий контроль качества работы промышленной установки ЭЛО очистки сточных вод. – Роспотребнадзор.

*Практическая работа* с использованием созданных способов и методов в рамках Программы по «Разработке и внедрению в производство комплекса прорывных, безопасных для человека и природы электронно-лучевых технологий и технических средств обезвреживания отходов и аварийных техногенных выбросов» предусматривает их адаптацию в отношении задач, решаемых с помощью ЭЛО технологии.

**Комплексный подход, реализуемый в данных исследованиях, позволит определять реальную степень экологической угрозы, дать наиболее полную и глубокую оценку влияния загрязнений на здоровье человека, состояние окружающей среды.**

Приложение №1

Директор ИФХЭ РАН  
член-корреспондент РАН,  
доктор химических наук



А. К. Буряк

подпись  
м.п.

ФИО

Дата составления заявки: «20» 04 2023 г.

## Приложение №2 к заявке на разработку

**КНТП полного инновационного цикла «Разработка и внедрение в производство комплекса прорывных, безопасных для человека и природы электронно-лучевых технологий и технических средств обезвреживания отходов и аварийных техногенных выбросов»**

### Работы, выполняемые ИФХЭ РАН

#### *Комплексные задачи программы, возлагаемые на ИФХЭ РАН:*

1. Разработка, создание и внедрение в научно-образовательную практику уникального научно-демонстрационного комплекса (установок, средств контроля и измерения, учебно-методических и информационных материалов) для электронно-лучевых исследований экологического назначения (при участии МГУ, см. табл. Т1-Проект в файле АВП-БП данные).
3. Разработка, производство и внедрение комплекса реакционного технологического оборудования и технологии для электронно-лучевого обезвреживания газообразных, жидких и твердых отходов (при участии НИИТФА, МГУ, РХТУ, см. табл. Т1-Проект в файле АВП-БП данные).
5. Разработка и внедрение комплексной методологии эко-мониторинга на объектах потенциального и текущего применения ЭЛО (при участии ИПЭЭ, см. табл. Т1-Проект в файле АВП-БП данные).

ИФХЭ РАН также сотрудничает с ИЯФ, НИИЭФА при выполнении комплексных задач 2 и 4: «№2 Разработка, производство и внедрение технологических высокомошных электронных ускорителей экологического назначения»; «№4 Разработка, производство и внедрение мобильного электронно-лучевого модуля и технологии его использования для ликвидации аварийных и чрезвычайных загрязнений».

Предполагаемые затраты ИФХЭ РАН на этапах выполнения программы показаны в табл. Т2-МБП и С1-С10 в файле АВП-БП данные.

ИФХЭ РАН располагает 5-ю специализированными лабораториями, компетентными исследования в области химии и физики высоких энергий - лаборатория радиационных технологий (руководитель д.т.н. Павлов Ю.С.), лаборатория электронно-лучевой конверсии энергоносителей (руководитель д.х.н. Пономарев А.В.), лаборатория электронных и фотонных процессов в полимерных наноматериалах (руководитель д.х.н. Некрасов А.А.), лаборатория радиационно-химических превращений материалов (руководитель член-корреспондент РАН Ершов Б.Г.), лаборатория радиоэкологических и радиационных проблем (руководитель академик Мясоедов Б.Ф.). В этих лабораториях трудятся 13 докторов наук и 23 кандидата наук. Научные должности: 9 главных научных сотрудников, 7 ведущих научных сотрудников, 16 старших научных сотрудника, 10 научных сотрудников и 4 младших научных сотрудника.

В ИФХЭ РАН действуют также 8 других лабораторий, связанных с исследованиями взаимодействия ионизирующих излучений с веществом (радиохимия, радиоэкология). Сотрудники этих лабораторий также могут привлекаться к выполнению работ по программе.

Для размещения УНУ, Институт располагает специализированным кирпичным зданием (ул. Обручева 40 стр. 5; инв. № 103, начальная стоимость 6 227 080,11 рублей на 01.10.1968 г.; с подземными и надземными помещениями), предназначенным для работы ускорителей электронов и иных источников ионизирующих излучений. Общая площадь 1032,9 кв.м, включая 5 бункеров с бетонной радиационной защитой, 2 пультовых помещения, механический участок и 9 вспомогательных комнат. В специальном помещении под куполом размещена историческая реликвия - первый в СССР и третий в мире ускоритель Cockcroft-Walton (У-003).

Помещения ускорителей оснащены приточно-вытяжной вентиляцией, откатными защитными дверями, приборами дозиметрического контроля (ДКС-АТ1123 (инв. № 68), ДРГ-01Т1 (инв. № 97 и № 98)) и уникальными системами телеметрии, управления и высоковольтного

питания. Для облучения объектов предусмотрены: металлический поворотный стол карусельного типа, стойки с выносными механизмами, стационарные стенды, реакционные сосуды с автоматическим управлением потоками газов и паров, термостаты, нагреватели образцов, микронизатор полимерных материалов P200, компьютеры и др.

Комплекс ускорителей ИФХЭ РАН представляет собой Уникальную Научную Установку – УНУ КРХИ (регистрационный номер УНУ на официальном сайте [www.ckr-rf.ru](http://www.ckr-rf.ru): 2056048; <https://phyche.ac.ru/structure/nauchnye-podrazdeleniya/unu-krkhi>). В состав УНУ включены: 1. Линейный ускоритель электронов LINS-03-350-EURF; 2. Радиационно-технологическая установка электронно-лучевой стерилизатор ЭЛС-2 с линейным ускорителем УЭЛВ-10-10-С-70; 3. Наносекундный импульсно-периодический ускоритель УРТ-1М.

Деятельность УНУ взаимосвязана с работой центра коллективного пользования, включающего:

- рентгеновский монокристалльный дифрактометр Каппа Apex II с системой охлаждения образца (Bruker);
- рентгеновский порошковый дифрактометр с печью до 1200 С Empyrean (Panalytical);
- трехкамерный альфа-спектрометр ALPHA-ARIA (ORTEC);
- уникальный комплекс для хроматоспектральных методов анализа с вариантом лазерной десорбции/ионизации;
- инфракрасный спектрометр с Фурье-преобразованием Nicolet 6700;
- рентгеновский малоугловой дифрактометр с температурной приставкой и возможностью исследований в геометрии скользящего падения (GISAXS) SAXSess (Anton Paar);
- ICP-MS спектрометр Agilent7500c;
- многомодульная система для термического анализа TA 5000 в комплекте (TA Instruments);
- ядерно-магнитный спектрометр Avance III 600 с различными приставками для изучения жидких и твердых образцов (Bruker);
- рамановский спектрометр Senterra (Bruker);
- автоматический жидкостинтилляционный низкофоновый альфа-бета-спектрометр Tri-Carb 3180TR/SL с активной защитой для измерения сверхмалых количеств альфа и бета излучателей (Perkin-Elmer);
- лабораторный цифровой гамма-спектрометрический комплекс с коаксиальным GEM30 и планарным GLP-36360 детекторами (ORTEC);
- микроскоп высоковакуумный сканирующий зондовый Enviroscope (Veeco);
- прибор для динамического светорассеяния Zetasizer Nano (Malvern);
- растровый электронный микроскоп с автоэмиссионным катодом QUANTA 650 FEG;
- спектрофлуориметр Fluorolog 3-22 (Horiba);
- и др.

Программа предусматривает создание (на базе ускорителей УНУ КРХИ) и внедрение в научно-образовательную практику уникального научно-демонстрационного комплекса (установок, средств контроля и измерения, учебно-методических и информационных материалов) для электронно-лучевых исследований экологического назначения. Глобальное повышение уровня знаний, прогресс в области физико-химических методов исследования и уникальные возможности химии высоких энергий, стимулирует рост требований пользователей к функциональным возможностям УНУ КРХИ. Вместе с тем ощущается разрыв между функциональными возможностями исходного оборудования и уровнем новых задач, обусловленных прогрессом науки и техники. В основе этого разрыва лежит совокупность обстоятельств, включая:

- расширение требований к доступному диапазону энергии, тока, частоты сканирования, частоты импульсов и другим параметрам облучателей;
- потребность в совершенствовании зон размещения подпучкового оборудования и повышении оперативности смены режимов облучения;
- повышение требований к системам экспресс-анализа, радиационного и химического контроля при проведении работ с ионизирующим излучением;
- снижение долговечности коммуникаций и систем регистрации радиолитических процессов под действием ионизирующего излучения;
- ограниченные параметры биологической защиты облучателей, затрудняющие переход от прерывистого (импульсного) к непрерывному облучению;
- исчерпание оригинальных запасных частей и физическое старение облучателей;
- моральное старение элементной базы в системах управления облучателями;
- высокая стоимость радиационной техники.

Уникальность УНУ, создаваемого в рамках настоящей программы, будет определяться следующими функциональными возможностями:

— это первый центр в РФ по **исследованию экологически-важных короткоживущих веществ**. Обычно имеют дело со стабильными материалами, свойства которых мало изменяются во времени. Однако в природоохранной практике, особенно при использовании электронно-

лучевых процессов или redox-реагентов, свойства веществ быстро меняются под действием биохимических, электрофизических и химических процессов. Уже через секунды или минуты состав облученного материала существенно отличается от исходного. В таких случаях требуется экспресс-анализ непосредственно во время обработки или незамедлительно после неё.

— это первый центр в РФ по **безреагентному (нехимическому) решению крупных экологических задач** – т.е. по снижению зависимости от реагентов/инициаторов (вредных и неэкономичных), снижению потерь энергии, устранению стадий с избыточными температурами, давлениями и агрессивными средами, кардинальному повышению управляемости процессов.

— это первый центр в РФ по **применению технологических ускорителей**, т.е. ускорителей с высоким током пучка. В отличие от циклических и линейных ускорителей, используемых в физике, где нужна высокая энергия (обычно выше порога ядерных превращений; >8 МэВ) и низкий ток пучка (<10 мА), облучатели в УНДК призваны моделировать промышленно-значимые процессы при высоком токе пучка (выше 100 мА) и умеренной энергии (ниже 8 МэВ) – т.е. именно в условиях, соответствующих крупнотоннажным технологиям.

— это инновационное средство **анализа реакций, вызываемых сильнейшими окислителями и восстановителями**, не имеющими аналогов среди привычных химикатов. Обычно химическая стойкость веществ оценивается при сравнении с бихроматом, перманганатом, хлором и подобными сильными redox-агентами. Однако в электронно-лучевых процессах, короткоживущие радикалы обладают более высокой реакционной способностью, что требует новых подходов к анализу стойкости веществ.

— это необходимое средство для **трансфера электронно-лучевых разработок от стадии «науки» на стадию «производства»**. В целом по миру, электронно-лучевые технологии приносят ежегодно свыше 70 млрд. долларов прибыли. Россия обладает высоким научным потенциалом, позволяющим сделать рывок в прибыльном развитии и распространении электронно-лучевых технологий у себя и в дружественных странах.

— это первый центр по разработкам **во всем промышленно-значимом диапазоне энергии электронов (0.4-8 МэВ)**, что необходимо для разумного выбора и оптимизации технологических параметров ускорителей и управления электронно-лучевым процессом.

— это центр **исследования быстропротекающих химических процессов** посредством передовых приемов импульсного радиолиза, что кардинально расширяет перспективу фундаментальных исследований химического действия ионизирующих излучений на вещество на всех стадиях, включая поглощение энергии, разрыв химических связей, перенос возбуждения и заряда, образование промежуточных соединений и формирование конечных стабильных продуктов.

— это центр разработки уникальных методов и технологий **управления биоразлагаемостью отходов**, включая методы балансировки химического (ХПК) и биохимического (БПК) потребления кислорода, а также активирования/инактивирования микроорганизмов.

— это центр разработки **стойких безвредных материалов и сред для межпланетных полетов**, экологически безопасного освоения планет, моделирования жизненно-важных процессов в верхних слоях атмосферы и других участках космического пространства, подвергаемых действию космического ионизирующего излучения.

— это центр реализации **синергетических эффектов**, когда комбинирование электронно-лучевого метода с иными методами (сорбция, озонирование, коагуляция, флотация и т.п.) дает очистной эффект, превышающий сумму индивидуальных эффектов.

— это центр разработки методов **селективного модифицирования поверхностных или объемных свойств материалов**, включая прочность, окисляемость, проницаемость, проводимость и другие практически важные свойства.

— это центр **профессиональной подготовки** (обучение, стажировка, практика) молодых специалистов в области электронно-лучевых технологий, исследования радиационной стойкости материалов и химических закономерностей взаимодействия излучений с веществом. Сегодня



студенты, аспиранты и молодые специалисты в подавляющем большинстве регионов не имеют доступа к реализации знаний на практике.

Ускорители ИФХЭ РАН востребованы и используются академическими Институтами, образовательными учреждениями (МГУ им. М.В. Ломоносова, МИТХТ, РХТУ им. Д.И. Менделеева, МАИ, МГТУ, МИФИ, МФТИ) и коммерческими компаниями РФ в фундаментальных и прикладных химических и физико-химических исследованиях в рамках Государственных программ, проектов и грантов научных фондов Российской Федерации, в том числе фундаментальных и прикладных исследований по оборонной тематике в рамках Государственного Оборонного заказа. В расширении функциональных возможностей УНДК заинтересованы также Государственные корпорации (ГазПром, РосАтом, РосКосмос, РосТех, РосНефть), МО РФ, ФСБ РФ, Международное Агентство по Атомной Энергии (МАГАТЭ). Услугами облучательного центра ежегодно пользуются более 20 организаций различного профиля и их число существенно возрастет в результате развития инфраструктуры и функциональных возможностей УНДК. Комплекс задействован в обучении студентов профильных вузов и аспирантов, в подготовке диссертационных работ, в получении новых научных результатов, публикуемых в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах. В частности, ускорители Института используются для масштабной стерилизации изделий медицинского назначения для компаний из разных регионов страны.

Работы по программе с опорой на инфраструктурное развитие УНУ соответствует актуальным задачам повышения интегрируемости отечественных исследователей в международные проекты, усиления позиций российских экспертов в координационной деятельности МАГАТЭ, ЮНЕСКО и других международных организаций, заинтересованных в решении глобальных проблем методами «зеленой» химии. Одним из важнейших условий активного международного сотрудничества пользователей УНДК в решении глобальных задач является обеспечение передового уровня оборудования. Реализация проекта позволит вывести УНУ в ряд передовых международных центров радиационно-химических исследований, способных разрабатывать и продвигать прорывные технологии и технические средства для электронно-лучевого анализа, синтеза и модифицирования материалов. УНУ способен стать действенным инструментом мирового уровня для решения приоритетных масштабных задач, определенных Стратегией научно-технического развития Российской Федерации.

Успешность выполнения программы определяется высокой квалификацией и заслуженным научным авторитетом профильных специалистов, задействованных в создании и работе УНУ. Ими опубликовано свыше тысячи статей в высокорейтинговых научных журналах и книгах, посвященных электронно-лучевым процессам. В Институте на разных этапах его развития были созданы первые отечественные установки импульсного радиоллиза с автоматизированной регистрацией быстропротекающих процессов, модельные и демонстрационные технологические установки, исследовательские комплексы с гамма-, рентгеновскими, нейтронными, ионными и электронными облучателями. Специалисты, задействованные в программе, участвовали в создании промышленных, опытно-промышленных, демонстрационных и исследовательских установок с ускорителями электронов в России, Болгарии, Китае, Польше, США, Франции и Южной Корее. Многие специалисты прошли стажировку в ведущих зарубежных научных центрах.

Научный коллектив имеет опыт совместных исследований по радиолитической конверсии материалов, в том числе с участием молодых членов научного коллектива, выполнявших или выполняющих курсовые и дипломные проекты по химии высоких энергий. Члены научного коллектива, задействованного в проекте, участвовали в разработке и популяризации новых электронно-лучевых подходов к обезвреживанию жидких антропогенных отходов (DOI: 10.1021/acs.est.0c00545, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2020.108812), в создании новых способов получения востребованных продуктов при электронно-лучевой цепной деградации высокомолекулярных соединений (Патенты РФ № 2579514 и № 2619122), детализации влияния низкоэнергетических электронов на агрегативную устойчивость водно-органических дисперсий (DOI: 10.1016/j.radphyschem.2015.09.017), обезвреживание токсичных микроводорослей

(DOI:10.1016/j.radphyschem.2020.109201) и взрывчатых веществ (DOI: 10.1016/j.mencom.2020.07.043), получения энергоносителей из полимерных отходов (DOI: 10.1016/j.radphyschem.2019.108664, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2019.01.016), инициирования структурных изменений радиолитических продуктов при варьировании условий облучения (DOI: 10.1016/j.radphyschem.2021.109460, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2019.01.011), оптимизации состава экстрагентов для переработки радиоактивных отходов (DOI: 10.1007/s10967-020-07375-3). Данные подходы будут использованы при выполнении настоящего проекта.

Членами научного коллектива был разработан метод цепного получения реагентов, мономеров и ингибиторов полимеризации из возобновляемой биомассы (DOI: 10.1016/j.mencom.2019.09.038, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2018.07.004), обоснованы проявления синергизма в деградации растительных макромолекул (DOI: 10.1007/s10086-018-1746-4, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2017.07.007), предложены улучшения в технологии упрочнения полимерных изделий (DOI: 10.1016/j.radphyschem.2015.03.019), разработан новый способ получения моторных топлив из тяжелых и легких углеводородов (DOI: 10.1016/j.radphyschem.2016.02.002, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2011.11.060, Патент РФ № 2437919, Патент РФ № 2436760). Эти наработки также будут использованы при выполнении настоящего проекта.

Результаты работ участников проекта многократно докладывались на авторитетнейших научных форумах: International Symposium on Ionizing Radiation and Polymers (IRaP), Tihany Symposium on Radiation Chemistry, International Conference on Development and Applications of Nuclear Technologies (NUTECH), конференциях МАГАТЭ, Менделеевских съездах по общей и прикладной химии, конференциях «Актуальные проблемы химии высоких энергий», International Workshop On Beam Dynamics And Optimization (BDO) и многих других.

В работу УНУ вовлекается большое число молодых исследователей, студентов и аспирантов в возрасте до 39 лет. В ходе реализации программы, доля исследователей в возрасте до 39 лет будет составлять не менее 50% от общей численности научного коллектива. Таким образом, совокупность опытных кадров с энергичным молодым поколением ученых позволяет рассчитывать на успешное выполнение работ по программе.

### **Международное сотрудничество**

Подавляющее большинство зарубежных физико-химических центров не располагают облучателями или имеют по одному облучателю с ограниченными параметрами пучка. УНУ должно иметь, как минимум, 4 облучателя разной энергии. Потенциально УНУ имеет практически неограниченные возможности по установке новых облучателей и сопряженного научного оборудования в специализированных помещениях с биологической защитой. В отличие от УНУ, в зарубежных научных центрах нет профильных специалистов по химии высоких энергий и радиационным технологиям, поскольку эти специальности отсутствуют в образовательных программах подавляющего большинства государств. Соответственно, УНУ предоставляет уникальные возможности для создания и развития новых радиационно-химических технологий и прикладной химии высоких энергий на международном уровне.

Оборудование КРХИ используется в решении приоритетных задач по программам Международного Агентства по Атомной Энергии (МАГАТЭ). За последние 3 года, специалисты УНУ КРХИ были инициаторами, координаторами и ключевыми участниками мероприятий МАГАТЭ, посвященных вопросам использования радиации в нано-технологиях, переработке полимерных отходов, синтезе мембран для энергетики, обезвреживании биологически-опасных загрязнений, а также по вопросам развития и использования высокомоощных электронных ускорителей (Development of Radiation-Grafted Membranes for Cleaner and Sustainable Energy (2018-2020), Emerging Application on Advanced Materials (2018-2019), Recent Achievements on the Removal of Biohazardous Pollutants by Radiation (2019-2020), Radiation-driven Processes in Nanoscience/Nanotechnology (2017-2019), Radiation Inactivation of Biohazards Using High Power Electron Beam Accelerators (2020), Recycling of Polymer Wastes by Radiation (2018-2021)).

В настоящее время облучатели УНУ КРХИ используются в работе по следующим Соглашениям ИФХЭ РАН с МАГАТЭ:

F22072 по программе «Development of Radiation-Grafted Membranes for Cleaner and Sustainable Energy» в рамках темы «Радиационно-управляемое получение привитых мембранных материалов для электрохимической конверсии и накопления энергии, очистки метана и синтеза биодизельного топлива» (Radiation-driven formation of grafted membrane materials for the electrochemical conversion and storage of energy, the refining of methane and the synthesis of biodiesel).

F23033 по программе «Radiation inactivation of biohazards using high power electron beam accelerators» в рамках темы «Инактивация биологически-опасных загрязнений в стоках животноводческих комплексов» (Inactivation of bio-hazards in effluents of livestock farms).

F23036 по программе "Recycling of Polymer Waste for Structural and Non-Structural Materials by using Ionizing Radiation» в рамках темы «Инженерное исследование радиационного окисления и молекулярно-массового перераспределения в высокомолекулярных материалах для улучшения переработки пластиковых отходов» (Engineering study of radiation oxidation and molecular-weight redistribution in high-molecular-weight materials to enhance plastic waste recycling)

RAS1014, региональный онлайн-курс обучения по программе «Переработка пластиковых отходов» (Online Regional Training Course for “Recycling of plastic waste”), разработанной специалистами КРХИ ИФХЭ РАН.

Оборудование УНДК использовалось для стажировки и повышения квалификации специалистов из Южной Кореи, Китая, Болгарии, Венгрии, Бангладеш, Вьетнама, Польши, Индии, Малазии, Индонезии, для работ по совершенствованию исследовательских ускорителей с компаниями России (ИЯФ СО РАН, НИИЭФА, ИЭФ УрО РАН, НИИТФА) и США (RadiaBeam Systems). На основе опыта работ с КРХИ, специалисты ИФХЭ РАН участвовали в создании исследовательских, демонстрационных и промышленных установок, в частности, в Южной Корее (с Samsung Heavy Industry и EBTech) и Китае (с компанией Дашэн и Университетом Синьхуа).

### **Ключевые работы по совершенствованию УНУ КРХИ**

Планируемое совершенствование УНУ КРХИ включает работы, обеспечивающие доведение параметров комплекса до уровня мировых аналогов и выше с реализацией уникальных исследовательских возможностей, повышением доступности и востребованности комплекса, расширением возможностей использования и разработки новых методик исследований и измерений. Основные направления модернизации:

а) Переоснащение линейного ускорителя электронов УЭЛВ-10-10Т (производитель – НПО «ТОРИЙ») с обновлением системы управления и мониторинга параметров пучка на основе современной элементной базы. УЭЛВ-10-10Т – ключевой облучатель для радиолиза при высокой энергии электронов. Сегодня энергия фокусируемого моноэнергетического пучка электронов составляет 8 МэВ, а ток пучка – 800 мкА, но без возможности варьирования этих параметров. Модернизация призвана обеспечить варьирование энергии (в диапазоне 4-8 МэВ) и тока пучка (в диапазоне 300-800 мкА), а также обеспечить вариативность развертки пучка. Модернизация также позволит повысить надежность работы ускорителя, автоматизировать исследовательские операции и дозиметрический контроль, внедрить систему оперативного мониторинга облучаемых объектов и мониторинга пространственно-временного распределения пучка, создать запас приоритетных и уникальных сменных частей. Предполагается реализовать потенциал ускорителя в инновационных процессах электронно-лучевой резки, сварки, фракционного испарения, легирования, 3D-печати, литографии и т.п. Тем самым, наряду с повышением долговечности, будут расширены функциональные возможности ускорителя до уровня мировых аналогов и выше него.

б) Совершенствование систем управления пучком на линейном ускорителе LINS-03-350-EURF (производитель RadiaBeam Systems, США). LINS-03-350-EURF – ключевой облучатель для радиолиза при энергии электронов от 2 до 3 МэВ с током пучка до 500 мкА. Он позволяет использовать как моноимпульсный режим облучения, так и квазинепрерывное облучение с частотой следования импульсов от 1 до 250 импульсов в секунду. Однако ускоритель не обладает

функцией варьирования геометрии пучка, востребованной пользователями. Совершенствование позволит многократно увеличить возможности изменения мощности поглощенной дозы для целей синтеза и модифицирования свойств материалов. Будет существенно увеличен срок службы выпускного окна ускорителя и обеспечено заданное варьирование пространственно-временных параметров пучка (в диапазоне начального диаметра пучка от 1 до 50 мм). Планируемое совершенствование расширит перспективы инновационного использования ускорителя, как для импульсного радиолиза низкоплотных сред, так и для квази-непрерывного облучения, в частности, в режимах электронно-лучевой перегонки, молекулярной сшивки, радиационной сортировки и других. Важная задача состоит также в обеспечении сменными частями, имеющими ограниченный срок службы (магнетрон, датчики, высоко-вакуумные насосы, выпускные фольгированные фланцы и др.), запас которых не был предусмотрен при приобретении ускорителя. В рамках импортозамещения, планируется частичный или полный (по результатам комплексной экспертизы) перевод ускорителя на отечественную элементную базу.

в) Модернизация импульсно-периодического ускорителя УРТ-1М (производитель ИЭФ УрО РАН) с обновлением высоковольтной структуры на основе современной элементной базы. Этот ускоритель дает уникальные возможности мульти-энергетического облучения со сплошным спектром энергии электронов от 0.2 до 1 МэВ, а также с изменением геометрии пучка (от прямоугольной до круглой в сечении). Требуется совершенствование высоковольтной структуры и усиление высоковольтной изоляции. Ускоритель способен давать низкоэнергетические пучки с низкой мощностью дозы, что делает его востребованным при проведении процессов тонкослойной блочной и прививочной полимеризации, сополимеризации, детоксикации, деминерализации, газофазного синтеза и других. Планируется разработать и реализовать охлаждение выпускного окна ускорителя, которое не было предусмотрено изначально. Предполагается совершенствование системы самотестирования высоковольтной структуры и, тем самым, повышение надежности работы ускорителя.

г) Создание целевых источников проникающего электромагнитного излучения. Расширение доступного диапазона энергии излучения планируется за счет создания сменных конверторов электронного пучка в тормозное электромагнитное излучение. В качестве поглотителей электронов предполагается использовать металлы и сплавы с высоким атомным номером (прежде всего, на основе вольфрама), обеспечивающие максимальную эффективность конверсии излучения. Конвертор предполагается адаптировать к ускорителю УЭЛВ-10-10Т. Кроме того, для исследования процессов в условиях фотоэлектрического эффекта, планируется расширить набор облучателей за счет приобретения стационарного рентгеновского излучателя. Он востребован для передовых исследований в области нанохимии, астрохимии, химии атмосферы, неомогенной кинетики и некоторых других.

д) Оснащение КРХИ установкой импульсного радиолиза плотных сред. Вышеописанный ускоритель LINS-03-350-EURF имеет энергию пучка до 3 МэВ, что позволяет с высокой равномерностью облучать водо-эквивалентные образцы толщиной не более 5 мм. Однако многие среды, представляющие научный и практический интерес, обладают существенно более высокой плотностью, в частности, концентрированные растворы солей, кристаллы, экстракционные системы. Для импульсного радиолиза таких образцов необходим пучок электронов с диаметром 1-2 мм, энергией от 5 до 8 МэВ и высоким током в одиночном импульсе. В свою очередь, импульсный радиолиз незаменим для фундаментальных исследований механизма и свойств короткоживущих продуктов радиолиза и, соответственно, для разработки методов управления радиолитическими превращениями. Таким образом, для соответствия КРХИ современному мировому уровню исследований, целесообразно расширить набор облучателей за счет современного ускорителя с параметрами пучка, удовлетворяющими требованиям создания системы импульсного радиолиза (наносекундного или субнаносекундного) с оптической регистрацией быстропротекающих процессов.

е) Усиление биологической защиты облучателей. Первоначально защита ускорителя УЭЛВ-10-10Т была рассчитана (еще в 1960-х годах) на импульсное облучение в условиях малой частоты повторения импульсов. Многие современные исследовательские задачи требуют

повышения частоты следования импульсов или непрерывного облучения в условиях более высокой мощности электронного пучка. Для того чтобы соответствовать этим задачам, комбинированная биологическая защита по периметру ускорителя должна быть усилена, в частности, за счет использования более толстых откатных дверей, удаления излишних технологических каналов, герметизации стыков и трещин, отделки стен водонепроницаемыми материалами, геометрического перепрофилирования входа-выхода. Биологическая защита ускорителей LINS-03-350-EURF и УРТ-1М также требует реновации механизмов в откатной двери.

ж) Оснащение УНУ КРХИ современными радиационно-стойкими датчиками, регистраторами и экспресс-анализаторами радиолитических процессов. Изменение состава и свойств облучаемых материалов происходит как во время облучения, так и после его завершения. Пост-радиационные изменения могут длиться от секунд до нескольких часов. Это препятствует анализу быстропротекающих радиационно-индуцируемых и пост-радиационных изменений на приборах, удаленных от помещений КРХИ. Радиационно-индуцируемые изменения, особенно промышленно-важные и/или потенциально опасные, должны регистрироваться незамедлительно. Соответственно, КРХИ надлежит оснастить оборудованием для экспресс-анализа (ГХМС, спектрофотометрия, ЭПР, ДСК/ТГМ и другие). Причем часть диагностического оборудования, расположенная в зоне облучения, должна быть в радиационно-стойком исполнении. Планируется также переоснастить помещения ускорителей современной телеметрической аппаратурой с выводом on-line сигналов на пульт управления.

з) Совершенствование подпучкового оборудования и зон его размещения. Проект предусматривает создание комплекса уникальных базовых устройств для радиолитического анализа газообразных, жидких и твердых сред в условиях стационарного, проточного и циркуляционного облучения. Приоритет будет отдаваться устройствам, моделирующим облучение в промышленных условиях (газлифт, струйный режим, конвейерный режим и другие), а также устройствам исследования тонких радиолитических эффектов фундаментального значения. Зоны размещения подпучкового оборудования планируется сделать максимально удобными для оперативной смены исследуемых объектов и/или для непрерывной транспортировки облучаемого материала по заданной траектории. В результате совершенствования, помещения КРХИ должны быть адаптированы для целей демонстрации передовых технологических процессов и эффектов потенциальным потребителям.

и) Модернизация систем дозиметрического и химического контроля рабочих зон. Вследствие реорганизации подпучковых зон, расширения энергетического диапазона излучения и масштаба исследований, потребуется усовершенствовать систему дозиметрического контроля в рабочих зонах облучателей в соответствии с действующими нормами и правилами. Кроме того, для надежного контроля и безопасности исследования процессов радиационно-индуцируемого газовой выделения, потребуется оснащение рабочих зон датчиками концентрации летучих веществ в воздухе рабочей зоны. Система датчиков должна быть скоординирована с системами вентиляции и блокировки защитных дверей.

к) Отладка и оптимизация оборудования УНУ. Развитие возможностей КРХИ будет проводиться на всех этапах выполнения программы в процессе масштабных фундаментальных научных исследований. По результатам исследований будут подготовлены публикации в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных «Scopus» и/или «Web of Science Core Collection».

л) Согласование оснащения КРХИ с оснащением центра коллективного пользования и профильных лабораторий. Пользователи КРХИ заинтересованы в максимально полном и оперативном измерении радиационно-индуцированных изменений в облучаемых материалах. Поэтому оснащение КРХИ будет проводиться на основе анализа наиболее распространенных требований пользователей к экспресс-анализу, а также альтернативных возможностей ЦКП ФМИ ИФХЭ РАН и других участников проекта. При оснащении УНУ КРХИ будут также учитываться аппаратные возможности специализированных лабораторий участников проекта, чье оборудование обладает ценностью в исследовании радиационно-индуцированных процессов. На

площадях КРХИ будет размещена подробная информация о возможностях этой уникальной научной установки.

м) Образовательная, экспертная и коммуникационная деятельность. Модернизация и исследовательская эксплуатация КРХИ будет использоваться для повышения профессионального уровня ученых в области химии высоких энергий, выявления талантливой молодежи и содействия её карьерному росту, формирования эффективной системы коммуникации между учеными и наукоемким инновационным бизнесом в предметной сфере проекта, повышения инвестиционной привлекательности, результативности и востребованности достижений химии высоких энергий, формирования и развития эффективных подходов к международной интеграции и сотрудничеству, повышения уровня участия России в международных системах научно-технической экспертизы и прогнозирования, совершенствования стандартов и форматов научно-образовательной деятельности по химии высоких энергий для обеспечения выхода российских научных, образовательных и производственных организаций на глобальные рынки знаний и технологий.

Возможности модернизированного КРХИ востребованы при создании и совершенствовании широкого ряда критических технологий Российской Федерации.

Приложение №2

Директор ИФХЭ РАН  
член-корреспондент РАН,  
доктор химических наук



А. К. Буряк

ФИО

Дата составления заявки: «20» 04 2023 г.

### Приложение №3 к заявке на разработку

**КНТП полного инновационного цикла «Разработка и внедрение в производство комплекса прорывных, безопасных для человека и природы электронно-лучевых технологий и технических средств обезвреживания отходов и аварийных техногенных выбросов»**

#### Работы, выполняемые ИЯФ СО РАН

ИЯФ СО РАН – ведущий изготовитель и разработчик промышленных ускорителей электронов в России. Более 250 ускорителей поставлены в 30 стран мира. Создатель мобильных ускорителей и установок. Проводит эксперименты по электронно-лучевой обработке модельных и реальных образцов. Разрабатывает новые модели сверхмощных ускорителей. Имеет собственные производственные мощности и приборы для физико-химических исследований. Ключевые задачи в рамках программы – изготовление мульти-пучкового ускорителя высокой мощности и испытательного стенда для него, разработка мобильной испытательно-демонстрационной установки, проведение наладочных работ и ресурсных испытаний.

#### Комплексные задачи программы, возлагаемые на ИЯФ СО РАН:

1. Для выполнения задачи по программе необходимы новые сверхмощные ускорители электронов. Предполагается **разработать ускоритель с максимальной энергией в диапазоне 1.2 – 1.5 МэВ и мощностью электронного пучка – 500 кВт**. Кроме того, ИЯФ СО РАН подготавливает свою часть исходных данных и технического задания для создания полномасштабных радиационно-технологических промышленных комплексов обезвреживания отходов. По мере изготовления ускорители испытываются в ИЯФ на вновь созданном стенде.

Предлагается **разработка, производство и внедрение мобильного электронно-лучевого модуля** и технологии его использования для ликвидации аварийных и чрезвычайных загрязнений. Подобная установка была создана ИЯФ совместно с Южно-Корейской фирмой EB-Tech. С учетом предыдущего опыта и необходимости импортозамещения мобильная установка может быть успешно реализована.

2. В настоящее время в ИЯФ СО РАН не имеется здания или бункера, пригодного для испытаний как высокомошных ускорителей, так и совместимого с ними технологического оборудования. Поэтому **строительство здания и создание такого стенда является первоочередной задачей**. На базе этого стенда будет производиться отработка конструкции высокомошных ускорителей и полномасштабной отработки электронно-лучевых технологий.

3. Новый стенд существенно **расширит возможности уже существующей в ИЯФ СО РАН УНУ ускоритель ЭЛВ-6**. Эта уникальная установка позволяет проводить эксперименты с выведенным в атмосферу электронным пучком, но ее максимальная мощность составляет 100 кВт.

4. В ИЯФ СО РАН базируется кафедра Электрофизических Установок и Ускорителей Физико-технического Факультета Новосибирского Государственного Технического Университета. Она располагает бакалавриатом и магистратурой. На ее **основе возможна подготовка руководителей как среднего, так и высшего звена комплексов электронно-лучевой обработки промышленного обеззараживания**. Считаем необходимым подключить к программе НГТУ в качестве образовательного учреждения.

#### Финансирование:

1. **Разработка и изготовление комплекта конструкторской документации** для ускорителя электронов с максимальной энергией в диапазоне 1.2-1.5 МэВ и мощностью пучка

500 кВт. Стоимость этапа 40 млн. руб. Срок исполнения этапа работ – 2 года от начала финансирования.

2. **Разработка и изготовление комплекта конструкторской документации** (без трейлера) для мобильного модуля электронно-лучевой обработки. Стоимость этапа (без трейлера для транспортировки) - 15 млн. руб. Срок исполнения этапа работ – 2 года от начала финансирования. Этапы 1 и 2 могут выполняться одновременно.

3. **Изготовление прототипа сверхмощного ускорителя (1.0\*400 мА).** Проверка на этом ускорителе технических решений для изготовления будущих серийных сверхмощных ускорителей. Стоимость этапа 80 млн. руб. Срок исполнения этапа работ – 2 года от начала финансирования.

4. **Изготовление первого образца сверхмощного ускорителя электронов с энергией 1.2-1.5 МэВ и мощностью пучка 500 кВт с последующей поставкой.** Стоимость этапа 150 млн. руб. Срок исполнения этапа работ – 3 года от начала финансирования.

5. **Изготовление первого образца мобильного электронно-лучевого модуля.** Срок изготовления – 2 года с момента получения трейлера. Ориентировочная стоимость (без трейлера) составляет 40 млн. руб.

6. **Проектирование и строительство здания для размещения сверхмощных ускорителей** для сборки, отладки и проверки, а также с возможностью проведения натуральных экспериментов в реальном масштабе. В здании должно быть предусмотрено помещение для складирования элементов ускорителя (ускорителей) как перед сборкой, так и перед отправкой заказчику. В здании необходимо предусмотреть также помещения для сборки и наладки мобильных ускорителей. Ориентировочная площадь помещений для сборки одного сверхмощного и одного мобильного ускорителя составляет около 1500 кв.м. Ориентировочная стоимость строительства здания в ценах 2022 г. составляет приблизительно 180 млн. руб.

Приложение №3

Директор ИФХЭ РАН

член-корреспондент РАН,

доктор химических наук



А. К. Буряк

подпись

м.п.

ФИО



Дата составления заявки: «20» 04 2023 г.



ЭТАП 10. (10-ый год) Авторский надзор за использованием технологий. Продвижение и оптимизация технологий.

Описание работ ИФХЭ:

Оптимизация и согласование документации. Анализ и устранение потерь энергии;  
 Популяризация результатов и перспектив; Техничко-экономический анализ;  
 Отбор проб; Планирование и выполнение НИР и ОКР; Анализ результатов;  
 Координация работ; Детализация завершающих работ

Затраты по статье «Выплаты персоналу»

Кадровый состав	Количество	Средняя заработная плата, руб/мес	Трудоёмкость, чел/мес	ФОТ, руб
ГНС	3	70 000	15	1 050 000
ВНС	4	60 000	25	1 500 000
СНС	5	50 000	25	1 250 000
НС, МНС	4	40 000	25	1 000 000
Инженер	2	45 000	10	450 000
Лаборант	3	25 000	25	625 000
			<b>ИТОГО:</b>	<b>5 875 000</b>

Затраты по статье «Закупка работ и услуг»

Изготовление нестандартного оборудования, экспертиза, ремонт и наладка  
**ИТОГО: 800 000**

Затраты по статье «Закупка производственных активов, нематериальных активов, материальных запасов и основных средств»

Наименование	Ед. изм.	Количество	Цена	Сумма
Реактивы и среды	комплект	0,1	1 500 000	150 000
Расходные материалы для оргтехники	комплект	0,1	5 000 000	500 000
Заготовки для кварцевых работ, химическая посуда	комплект	0,1	2 000 000	200 000
Вспомогательные реагенты, носители и материалы, сменные части к системе экспресс-анализа	комплект	0,1	2 000 000	200 000

**ИТОГО: 1 050 000**

Затраты по статье «Уплата налогов, сборов»

30.2% от ФОТ **ИТОГО: 1 774 250**

Затраты по статье «Иные выплаты»

Содержание помещений и инфраструктуры УНУ  
**ИТОГО: 2 841 000**

Затраты по статье «Командировочные расходы»

Согласования между участниками программы  
**ИТОГО: 180 000**

Директор ИФХЭ РАН  
 член-корреспондент РАН,  
 доктор химических наук  
 \_\_\_\_\_ А. К. Буряк  
 подпись Ф.И.О.  
 м.п.

Дата составления заявки:  
 10.07.2023 г.

