

№ 2 (39), 2018

ISSN 1818-0744



ВЕСТНИК

Международного университета
природы, общества и человека
«Дубна»

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ



Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна»

Серия «Естественные и инженерные науки»

№ 2 (39), 2018

Выходит с ноября 1996 года

Редакционный совет:

Фурсаев Д. В.
(председатель)
Багдасарьян Н. Г.
Венгер А. Л.
Капаччиоли М. (Италия)
Кореньков В. В.
Клейнер Г. Б.
Красавин Е. А.
Крюков Ю. А.
Кузнецов О. Л.
Малахов А. И.
Михайлова Н. В.
Оганесян Ю. Ц.
Островский М. А.
Сахаров Ю. С.
Черемисина Е. Н.
Черепанова В. Г.

Редакционная коллегия:

Деникин А. С.
(гл. редактор)
Савватеева О. А.
(зам. гл. редактора,
отв. секретарь)
Полотнянко Н. А.
(техн. секретарь)
Анисимова О. В.
Борейко А. В.
Гладышев П. П.
Каляшин С. В.
Карпов А. В.
Колганова Е. А.
Немченко И. Б.
Сокотущенко В. Н.

В номере:

<i>Веницианов Е.В.</i> К вопросу развития системы комплексного мониторинга водных объектов	3
<i>Иванова А.И., Лазарева Г.А., Кузнецова Н.В.</i> Оценка качества воды реки Волгуши по макрофитам.....	9
<i>Казарцев С.В., Егоров В.Г.</i> Стенд для исследования свойств сцинтилляционных материалов.....	16
<i>Пискунова В.С., Новичков Р.В., Зуев Б.К.</i> Окситермография в качестве нового метода оценки модификации поверхности наночастиц диоксида кремния 3-аминопропилтриэтоксисиланом.....	21
<i>Рахмонов И.Р., Шукринов Ю.М., Родин К.М.</i> Моделирование вольт-амперной характеристики кольцевой системы параллельных джозефсоновских переходов.....	29
<i>Спиридонова А.Б., Савватеева О.А.</i> ВУРС: динамика и прогноз.....	35
<i>Тимошенко Г.Н., Горячева Я.А.</i> Радиационные риски профессионального хронического облучения сотрудников Производственного объединения «Маяк».....	43
<i>Фадеекина И.Н., Огурцова А.В.</i> Модификация поверхности сорбентов полианилином.....	52

ISSN 1818-0744

Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
ПИ № ФС77-25824 от 28 сентября
2006 г.

© Государственный университет,
«Дубна», 2018

*Все рукописи
рецензируются*

Корректор
Цепилова Ю.С.

**Макет и верстка
номера**
Цепилова Ю.С.

*Мнение редакции может
не совпадать с мнением
авторов*

Адрес редакции
141982, г. Дубна Моск. обл.,
ул. Университетская, 19
Тел.: (+7 49621)6-60-89, 1355
E-mail: izdat@uni-dubna.ru

Подписано в печать 10.07.2018.

Формат 60×90/8.

Усл. печ. л. 7,75.

Тираж 150 экз. Заказ № 5.

Отпечатано в общем отделе
университета «Дубна»
141980, г. Дубна Моск. обл.,
ул. Университетская, 19



Bulletin of Dubna International University for Nature, Society, and Man

Seria "Natural and engineering sciences"

No. 2 (39), 2018

Published since November 1996

Editorial council:

Fursaev D. V.
(Chairman)
Bagdasarjan N. G.
Capaccioli M.
Cheremisina Eu. N.
Cherepanova V. G.
Kleiner G. B.
Korenkov V. V.
Krasavin Eu. A.
Kryukov Y. A.
Kuznetsov O. L.
Malakhov A. I.
Mikhailova N. V.
Oganessian Yu. T.
Ostrovsky M. A.
Sakharov Yu. S.
Venger A. L.

Editorial board:

Denikin A. S.
(Chief Editor)
Savvateeva O. A.
(Deputy Chief Editor,
Executive Secretary)
Polotnyanko N. A.
(Technical Editor)
Anisimova O. V.
Boreyko A. V.
Gladyshev P.P.
Kalyashin S. V.
Karpov A. V.
Kolganova E. A.
Nemchenok I. B.
Sokotushchenko V. N.

In the issue:

<i>Venitsianov E.V.</i> The questions of development of the system of complex monitoring of water objects.....	3
<i>Ivanova A.I., Lazareva G.A., Kuznetsova N.V.</i> Evaluation of the water quality of the Volgusha river in macrophytes.....	9
<i>Kazartsev S.V., Egorov V.G.</i> A test-bench for investigation and comparison of different scintillators.....	16
<i>Piskunova V.S., Novichkov R.V., Zuev B.K.</i> Oxythermography as a method of assessment of modification of a nanoparticles surface of silicon dioxide by organic compounds	21
<i>Shukrinov Yu.M., Rahmonov I.R., Rodin K.M.</i> Simulation of the current-voltage characteristic of a ring system of parallel Josephson junctions.....	29
<i>Spiridonova A.B., Savvateeva O.A.</i> EURT: dynamics and forecast.....	35
<i>Timoshenko G.N., Goryacheva Y.A.</i> Radiation risks of occupational chronic exposure to employees of the production association "Mayak".....	43
<i>Fadeikina I.N., Ogurtsova A.V.</i> Surface modification of the sorbent conductive polymers for example polyaniline.....	52

ISSN 1818-0744

Certificate of Registration
No. ПИ № ФС77-25824
of 28 September 2006

© Dubna State University, 2018

All manuscripts are reviewed

Proof-reader
Tcepilova J. S.

Issue make-up
Tcepilova J. S.

The opinion of publishing author not
always coincides with the editorial
opinion

Editorial board address:
19 Universitetskaya St., 141982 Dubna,
Moscow Region, Russia
Phone: (+7 49621)6-60-89, 1355
E-mail: izdat@uni-dubna.ru

Passed for printing
on 10.07.2018
150 copies

УДК 57.013

*Е. В. Веницианов***К вопросу развития системы комплексного мониторинга водных объектов**

Предлагается методология проектирования и развития системы мониторинга водных объектов с учетом современных требований к получаемой информации, необходимой при оценке качества вод для разных видов водопользования, в том числе питьевого водоснабжения; экологического состояния водных объектов; разработки мероприятий по охране вод.

Ключевые слова: мониторинг водных объектов, гидрологические, гидрохимические, гидробиологические показатели качества вод, проектирование мониторинга, информационное обеспечение.

Об авторе

Веницианов Евгений Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией охраны вод ФГБУН Института водных проблем Российской академии наук, профессор кафедры химии, новых технологий и материалов государственного университета «Дубна». *E-mail:* eugeniy.venitsianov@gmail.com. 119333 г. Москва, ул. Губкина, д. 3.

В связи с реализацией второго этапа реконструкции сети мониторинга в России представляется важным рассмотреть перспективы ее развития. Для обозначения крупных отраслевых информационно-технологических систем в настоящее время используется понятие «технологическая платформа» как совокупности взаимосвязанных технологий, направленных на достижение единой цели, в данном случае – мониторинга водных объектов. В основе методологии ее проектирования лежит модульный принцип. При этом каждый модуль может использоваться самостоятельно или интегрироваться при необходимости с другими модулями через стандартные и единые форматы представления конечных для каждого модуля результатов.

Мониторинг собственно водных объектов должен включать в себя:

- мониторинг поверхностных вод (гидрологический, гидрофизический, гидрохимический, гидрометрический, гидрогеологический);
- донных отложений;
- подземных вод, особенно гидравлически связанных с поверхностными водами;
- мониторинг берегов и водоохранной зоны;
- мониторинг гидробиоты как взаимосвязанных компонентов экосистемы водного объекта.

Мониторинг территории водосбора, в свою очередь, включает в себя мониторинг природных и антропогенных компонентов, способных влиять на состояние контролируемого водного объекта.

Применительно к антропогенным компонентам рекомендуется использовать паспортизацию промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных предприятий-загрязнителей, включая предприятия по очистке промышленных и коммунальных стоков.

Разработке подлежит также методология учета распределенных источников загрязнения вод и учета их вклада в общее загрязнение вод.

Отметим необходимость создания методики формирования **регистра химических веществ**, используемых или (и) производимых на территории водосбора, с оценкой риска их попадания в водную среду, токсикологической опасности для гидробиоты и для населения как потребителя питьевых вод. При этом оценка токсикологической опасности должна производиться как по данным нормативных документов (предельно-допустимых концентраций – **ПДК**, ориентировочных допустимых уровней – **ОДУ**), так и с использованием международных и национальных регистров химических элементов и химических соединений, суммирующих их физико-химические характеристики и дающих оценки биологической активности. Использование таких регистров целесообразно при обнаружении веществ, для которых отсутствуют нормативные ограничения концентраций. В связи с существованием многих реги-

сторов подобного содержания целесообразно создание автоматической поисковой системы (скрининг регистров), а также технологии для расчетного прогноза токсичности по химической структуре вещества.

Самыми распространенными и наиболее часто используемыми **методами химического анализа** для определения органических соединений в настоящее время являются хроматография и хромато-масс-спектрометрия. Тотальный скрининг является необходимым первичным методом, задача которого – определение гидрохимического профиля водного объекта или его участков. Методы идентификации можно разделить на две группы:

1) идентификация путем сравнения с известными данными (спектром);

2) идентификация по результатам анализа.

Разработаны программные средства для качественного и количественного мультикомпонентного скрининга, позволяющие однозначно определять молекулярные формулы любых веществ. Например, программный пакет *TargetAnalysis* включает в себя базу данных на более чем 50 000 соединений.

Разработка концепции программного обеспечения в рамках мониторинга водных объектов – МВО – диктуется необходимостью создания единого информационного поля для всех распределенных баз данных о состоянии природных вод. Такие базы данных по стандартной программе должны формироваться всеми организациями региона или бассейна, занятыми оценкой состояния водных объектов, исходя из собственных задач.

Сейчас подобная интеграция реально отсутствует. Не ведется интеркалибровка различных лабораторий, что приводит к значительному расхождению данных, получаемых различными организациями даже на одних и тех же створах в одно и то же время. Научные принципы и конкретная методика такой интеркалибровки также подлежат разработке.

Все наблюдательные технологии мониторинга по отношению к объекту измерения можно разделить на контактные и дистанционные. Концепция оптимального сочетания этих технологий в МВО применительно к конкретным задачам мониторинга и целям управления отсутствует. Она должна быть разработана на основе анализа развития этих технологий, их адекватности поставленным задачам, с учетом экономических аспектов и других показателей.

Комплексность мониторинга должна также проявляться в оптимальном сочетании измерительных и информационных технологий.

Научные исследования показывают, что при широком ассортименте загрязняющих веществ, характерном для большинства природных поверхностных вод суши в России, учет их комплексного опасного воздействия на живые организмы невозможен без данных **гидробиологического мониторинга**. В связи с этим следует отметить, что в России есть только два общероссийских стандарта определения качества воды по гидробиологическим показателям, хотя среди стандартов ISO их не менее 50. Необходимо интегрировать результаты мониторинга водных объектов с данными социально-гигиенического мониторинга, включая оценку влияния водного фактора на здоровье населения.

Мониторинг загрязнения природных вод – систематические наблюдения за накоплением в природных водах веществ антропогенного или (и) природного происхождения и опасных организмов, а также наблюдение за воздействием химических, физических и биологических факторов, которые изменяют фоновые характеристики вод. Кроме того, в функции мониторинга загрязнения природных вод входит выявление источников загрязнения и прогнозирование развития экологической ситуации.

Существенные цели мониторинга загрязнения природных вод – оценка текущего состояния природных вод, составление баланса загрязнений, прогноз изменения экологической ситуации, оценка и динамика экологических рисков, определение конкретных факторов и источников загрязнения, формирование предложений по снижению уровня загрязнения природных вод, информационная поддержка управляющих решений, направленных на минимизацию ущербов от загрязнения для экосистем и населения.

Принципиальный подход к оценке экологических рисков на основе риск-ориентированного подхода включает три составляющие [8]:

- оценка опасности – сбор и анализ информации о физико-химических и биологических свойствах вещества, способах производства и использования, воздействии на ОС. В случае, если в результате проведенной оценки вещество не попадает под критерии классифи-

кации опасных веществ и не является стойким / склонным к биоаккумуляции / токсичным, процесс оценки завершается;

- оценка воздействия – определение степени воздействия вещества на человека и ОС на всех этапах жизненного цикла вещества, с учетом всех способов его производства и использования;

- характеристика риска – сравнение уровня воздействия вещества с безопасными пороговыми значениями для человека и ОС.

Для проведения оценки должны быть обязательно определены все стадии жизненного цикла (ЖЦ) вещества, что позволяет установить границы проведения оценки рисков. Для этого определяются: способы использования вещества на каждой стадии ЖЦ; все возможные виды поступления вещества в ОС на всех стадиях ЖЦ; возможные объекты, на которое вещество может оказывать воздействие.

Мониторинг загрязнения природных вод должен учитывать загрязнение водосборной территории, в том числе снегового покрова в бассейне контролируемого водного объекта, а также учитывать наличие гидротехнических сооружений, способных влиять на перемещение загрязнений и их трансформацию, например в водохранилищах.

В ряде случаев поиск источников загрязнения природных вод должен быть связан с мониторингом загрязнения атмосферы. Мониторинг загрязнения природных вод должен быть связан с другими видами мониторинга: гидрологическим, гидрогеологическим, донных отложений, ландшафтным и др.

Нормирование показателей качества вод определяется наличием соответствующего документа, представляющего характеристику опасного воздействия либо соответствующий перечень, ограничивающий или запрещающий использование этих веществ. Примерами документов второго типа являются списки приоритетных загрязняющих веществ (разработанные в США и в Европейском Союзе), которые для различных компонентов окружающей среды (в частности, для воды) содержат перечни 100–150 наиболее опасных загрязняющих веществ, часто встречающихся в окружающей среде (основные классы таких веществ: галогенуглеводороды, хлорорганические пестициды, галоидные эфиры, нитрозоамины и др.) [3; 5]. Принято Распоряжение Правительства РФ от 8 июля 2015 г. № 1316-р «Об утверждении перечня за-

грязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды», включающее 249 компонентов (веществ, радиоактивных изотопов, микроорганизмов и других показателей) [4].

Одной из проблем мониторинга загрязнения природных вод является многочисленность химических соединений (на начало августа 2016 г. в соответствующей международной системе их зарегистрировано более 117 млн [7]). Очевидно, что число таких соединений слишком велико для того, чтобы нормировать содержание каждого из них. Возможное решение этой проблемы – поиск обнаруженного ксенобиотика в международных регистрах, где может быть представлено описание биологической активности этого вещества или класса веществ, к которому принадлежит анализируемое вещество, а также расчеты такой активности по химической структуре вещества.

В принципе возможна идентификация любых органических ксенобиотиков, находящихся в воде, в концентрациях 10 нг/дм³, а в ряде случаев до 0,1 нг/дм³ при соответствующей пробоподготовке и выборе оптимального метода идентификации и определения. Идентификация соединений, находящихся в воде, позволяет не только формально определить их номенклатуру, а также структурные формулы и на основе этих данных оценить вид их опасного действия, а в некоторых случаях и пределы опасных концентраций даже при отсутствии нормированных значений ПДК для них [2].

Для этого следует использовать расчетные методы оценки вида токсичности вещества и его опасных концентраций, которые формируются на основе знаний структуры вещества и/или его физико-химических характеристик, а также на информационных технологиях, связанных с поиском сведений об опасности веществ в международных базах данных и регистрах.

В разработанной системе оценки биологической опасности [9] ксенобиотиков используется 14 международных и национальных баз данных и программа прогноза биологической активности соединений по их структуре *PASS (Prediction of Activity Spectra for Substances)*. Современная версия компьютерной программы *PASS 2014* прогнозирует 7157 активностей на основе данных о 960 тыс. соединений. Средняя точность предсказания, рассчитанная по методу исключения по одному, составляет 94,1%. Спи-

сок прогнозируемых PASS видов биологической активности включает в себя основные и побочные фармакологические эффекты, биохимические механизмы действия, специфическую токсичность, мишени в организме. Результатом прогноза в программе являются вероятности наличия и отсутствия конкретного вида активности, т.е. эта система основана на риск-ориентированном подходе к оценке экологической опасности.

Методы на основе обучающей выборки позволяют также прогнозировать и некоторые количественные характеристики токсичности. Например, по программе *GUSAR* можно провести расчет следующих экотоксикологических показателей:

- фактор биоаккумуляции,
- показатель острой токсичности LD50 (средняя смертельная концентрация для тестируемых организмов),
- IGC50 (концентрация полумаксимального ингибирования роста).

Методы анализа содержания примесных веществ в воде – традиционные аналитические методы. В мониторинге загрязнения природных вод также активно используются технологии, связанные с использованием биоиндикаторов, биодетекторов, биотестеров и биосенсоров. При многокомпонентном загрязнении вод биологический мониторинг – важное направление мониторинга загрязнения природных вод, т.к. простая аддитивность одновременного воздействия разных веществ не учитывает возможного синергизма и ряда других побочных явлений.

В мониторинге загрязнения природных вод используются технологии контактного и дистанционного видов мониторинга. Разработка систем мониторинга загрязнения природных вод и их технологических платформ включает определение целей, выбор определяемых показателей, зон и горизонтов регистрации, измерительных средств, их носителей, принципов передачи данных, требований к информационной системе, включая геоинформационную. Системы мониторинга загрязнения природных вод могут при этом функционировать в автоматическом, автоматизированном и «ручном» режимах.

При организации мониторинга на водных объектах, территория водосбора которых находится в зоне влияния определенных производственных отраслей, систему наблюдений следует ориентировать на факторы воздействия, связанные именно с этим видом производств

(например, пестициды и удобрения в зоне сельскохозяйственного производства; нефтяные загрязнения на танкерных путях и на припортовых акваториях нефтяных терминалов).

При организации мониторинга загрязнения природных вод по микробиологическим и паразитологическим показателям могут использоваться как традиционные показатели, применяемые в отечественной практике оценки питьевых вод (общее микробное число, общее количество колиформных бактерий, количество цист лямблий и др.; см. подробнее СанПиН 2.1.4.1074-01 [6]), так и показатели, характеризующие содержание конкретных патогенных форм с учетом географического местоположения водного объекта.

Некоторые требования к системам мониторинга водных объектов при оценке качества вод. Можно сформулировать ряд требований, которые позволяют оптимизировать соотношение «затраты – информационная ценность». Можно выделить как минимальную следующую систему показателей:

- базовые параметры – уровень воды, скорость течения, расход воды, температура, содержание взвешенных веществ, растворенного кислорода, рН, электропроводность;
- геохимические (фоновые) параметры, отражающие геологическое строение бассейна – общая жесткость, щелочность, кальция, магний и т.д.;
- параметры, характеризующие влияние хозяйственной деятельности на качество вод, прежде всего биогенные вещества (соединения азота, фосфора, ХПК, БПК и др.);
- тяжелые металлы, радиоактивность и органические микрозагрязнения;
- гидробиологические показатели.

В США загрязняющие вещества (всего 129 элементов или соединений) были сгруппированы в 10 групп, в том числе: пестициды, тяжелые металлы, полихлорированные бифенилы, алифатические соединения, фенолы, полициклические ароматические углеводороды, нитрозамины. Среди наиболее часто встречающихся металлов отмечены медь, свинец и цинк; для органических веществ характерен более разнообразный спектр веществ, что означает учет «индивидуальности» каждого водного объекта. Это возможно при проектировании системы МВО.

Среди компонентов мониторинга наибольшую сложность представляет анализ органических веществ. Под влиянием комплекса физико-химических и биологических факторов они образуют еще большее число производных. Практически количество регистрируемых показателей исчисляется несколькими десятками. Известно много случаев, когда содержание измеряемых веществ намного ниже ПДК, а вода проявляет значительную токсичность вследствие синергизма компонентов или наличия неучтенных ингредиентов. Это демонстрирует недостаточную информативность гидрохимических показателей. Системы МВО необходимо базировать как на гидрохимических, так и на гидробиологических показателях.

Статистические требования к данным мониторинга. Следует учитывать стохастическую природу показателей качества природных вод, которые фиксируются службами мониторинга. Необходимо проводить статистическую обработку данных наблюдений, учитывая при этом, что распределение показателей часто не подчиняется нормальному закону. Кроме статистической обработки данных необходимым этапом анализа временных рядов наблюдений является оценка однородности рядов и трендов изменения показателей.

Предпроектное обследование при мониторинге водных объектов. Предпроектное обследование предполагает сбор (в рамках уже существующих сведений) имеющейся информации о состоянии выбранного водного объекта, а именно [1]:

- подробную физико-географическую характеристику (основные морфометрические показатели, геоморфология, гидрологический и термический режимы, описание климата, почв, животных и растительных составляющих гидробиоты и прибрежной суши, с оценкой экосистемных связей гидробиоты;

- гидрофизическую, гидрохимическую и гидробиологическую характеристику воды и донных отложений;

- характеристику основных притоков, оказывающих влияние на формирование качества вод обследуемого водного объекта;

- оценку возможного влияния территории водосбора и атмосферного переноса на качество вод;

- оценку основных источников негативного антропогенного воздействия на формирование качества вод и их характеристику;

- характеристику хозяйственной и социальной инфраструктуры, вред которой может быть нанесен при экстремальном загрязнении вод;

- характеристику демографического и социального состава населения, для которого экологические риски могут реализоваться в определенный вред здоровью или в социальные ущербы;

- анализ существующей наблюдательной сети и системы мониторинга водных объектов, включая её технологическую платформу;

- анализ существующего информационного обмена между организациями, осуществляющими контроль состояния водных объектов в пределах выбранного для обследования объекта;

- определение основных научных и функциональных принципов проектируемой системы мониторинга и его технологической платформы.

Предпроектное обследование является источником большого объема информации, которая должна быть структурирована и представлена в виде системы баз данных или в составе управляющего хранилища, что одновременно является первым этапом создания многофункциональной информационной системы мониторинга водных объектов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-05-00842.

Библиографический список

1. Авандеева О.П., Степановская И.А., Баренбойм Г.М. Проектирование информационной системы мониторинга качества вод (с учетом особенностей нефтегенного загрязнения) // Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление. Сборник трудов Второй открытой конференции Научно-образовательного центра, 20–21 декабря 2012 г. М.: ИВП РАН, Кафедра гидрологии МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. С. 12–26.

2. Отто М. Современные методы аналитической химии. М.: Техносфера, 2008. 544 с.

3. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектах рыбохозяйственного значения» (утв. приказом Федерального агентства по рыболовству от 18 января 2010 г. № 20).

4. Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды (утв. распоряжением Правительства РФ от 8 июля 2015 г. N 1316-р).

5. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ГН 2.1.5.1315-03).

6. СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспе-

чению безопасности систем горячего водоснабжения». URL: <http://docs.cntd.ru/document/901798042>.

7. Chemical Abstracts Service (CAS). URL: <http://www.cas.org/>.

8. Dara L. A Strategic approach to risk based regulation by the EPA, Ireland. URL: http://risksummit.eu/wp-content/uploads/2013/03/risk-based-regulation-by-the-epa-ireland_dara-lynott.pdf.

9. Filimonov D.A., Lagunin A.A., Glorizova T.A., Rudik A.V., Druzhilovskii D.S., Pogodin P.V., Poroikov V.V. Prediction of the biological activity spectra of organic compounds using the pass online web resource// Chemistry of Heterocyclic Compounds. 2014. V. 50 (3). P. 444–457.

Поступила в редакцию
26.05.2018

УДК 574.58

А. И. Иванова, Г. А. Лазарева, Н. В. Кузнецова**Оценка качества воды реки Волгуши по макрофитам**

Представлены результаты оценки качества воды реки Волгуши по макрофитам с помощью сапробиологического анализа – оценка степени загрязненности вод производилась по индикаторным организмам. Также дана характеристика водной растительности реки, описан видовой состав макрофитов и проективное покрытие (зарастаемость).

Ключевые слова: макрофиты, вид-индикатор, сапробность, гелофиты, погруженные гидрофиты, гидрофиты с плавающими листьями.

Об авторах

Иванова Алина Игоревна – магистрант кафедры, экологии и наук о Земле государственного университета «Дубна». E-mail: aii-95@yandex.ru. 141821 Московская обл., г. Дмитров, п.Рыбное, д. 36.

Лазарева Галина Александровна – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и наук о Земле государственного университета «Дубна».

Кузнецова Наталья Владимировна – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии Дмитровского рыбохозяйственного технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АГТУ».

Загрязнение водных объектов – актуальная экологическая проблема XXI века. Сточные воды (бытовые, промышленные, сельскохозяйственные и пр.), поступающие в водные объекты, помимо органических и биогенных элементов привносят в реки соли тяжелых металлов, нефтепродукты и прочие ксенобиотики [1]. Загрязнение ведет к деградации речной экосистемы и, как следствие, к ухудшению качества воды, поскольку река уже не способна к самоочищению [3]. При этом реки, в том числе малые, являются средой обитания водных организмов, которые не только обеспечивают самоочищение воды, но и являются индикатором качества воды, реагируя на все виды загрязнений независимо от их природы.

Высшие водные растения являются главными элементами водных экосистем, играют определяющую роль в процессах формирования качества воды и биологического режима в водных объектах, которые испытывают значительное антропогенное влияние [2]. Заросли макрофитов перехватывают поступающие с водосбора биогенные элементы и связывают их на длительное время [3]. Чем больше суммарная поверхность растений, тем эффективнее их роль как фильтраторов [5]. Водная флора интенсивно поглощает различные веще-

ства, аккумулирует ионы тяжелых металлов и радионуклиды, выступает в роли детоксикантов пестицидов и нефтепродуктов [10].

Видовой состав гидрофитоценозов зависит от химического состава воды, характеристики грунта, наличия и скорости течения, загрязнения водоемов органическими и токсическими веществами [11].

В состав макрофитов входят следующие экологические типы: гидрофиты – настоящие водные растения, полностью или большей своей частью погруженные в воду, гидрофиты – растения избыточного увлажнения и гелофиты – водно-болотные (земноводные) растения [12].

Использование макрофитов в качестве биоиндикаторов зачастую осложнено, поскольку значительная часть их обладает высокой толерантностью к факторам среды, однако их легко идентифицировать и они в течение многих лет занимают определенные биотопы водоема, что способствует их широкому применению в биоиндикации. Поэтому гидрофитоценозы могут служить весьма информативным показателем степени загрязнения экосистемы водного объекта [3].

Материал и методы

Объектом исследования является река Волгуша, протекающая в северной части Московской области и относящаяся к бассейну Верхней Волги. Река берет свое начало из озера Нерское, расположенного на юге Дмитровского района, первые 10 км от истока протекает по

заболоченной местности, затем глубокая долина Волгуши пересекает Клинско-Дмитровскую грядку, образуя в низовьях живописнейший Парамоновский овраг, где организован государственный природный заказник «Долина реки Волгуши и Парамоновский овраг» [8].

Длина реки около 40 км, при этом ее водосборная площадь составляет 284 км². Притоками р. Волгуши являются р. Каменка в пределах верхнего течения и р. Икша, впадающая в р. Волгушу примерно в 0,5 км от ее устья в р. Яхроме.

По условиям питания и режиму р. Волгуша относится к восточно-европейскому типу, имея преимущественно снеговое питание – свыше 60%, а также за счет летних и осенних дождей, потому для нее характерны высокое половодье, продолжающееся 2–3 недели, низкие продолжительная летне-осенняя и зимняя межени. В межень ширина русла р. Волгуши на разных участках колеблется в пределах 2,5–5 м. При средней глубине около 1 м по руслу можно наблюдать глубины в пределах 0,5–2,0 м, относительно большие глубины отмечены на расширенных участках русла, редко наблюдаются участки и с каменистыми перекатами [6].

Исследования р. Волгуши проводились в 2017 г. в вегетационный период с июня по август. На всём протяжении реки было выбрано 5 створов для описания высшей водной растительности, таким образом, река охвачена от истоков до устья (рис. 1).

Была дана характеристика водной растительности реки, описан видовой состав макрофитов и проективное покрытие (зарастаемость). Проведена биоиндикация качества воды по сообществу макрофитов с использованием индекса сапробности.

Индекс сапробности исследуемых участков рассчитывают по формуле

$$S = \sum s h / \sum h, \quad (1)$$

где Σ – сумма; S – индекс значимости вида; h – относительное число особей. Относительное количество особей вида (h) оценивают следующим образом: случайные находки – 1, частая встречаемость растений каждого вида – 3 и массовое развитие – 5 [14; 15; 16].

Проективное покрытие – заполненность поверхности воды, грунта или дна растениями при рассмотрении сверху – выражалась в процентах по отношению ко всей поверхности пробной площадки, которая принимается за 100%.

Характеристика степени зарастания реки и ее участков оценивалась следующим образом: не зарастающие – растительность занимает менее 1% площади участка русла, очень слабо зарастающие – 1–10%, слабо зарастающие – 11–25%, умеренно зарастающие – 26–50%, сильно зарастающие – 51–75% и очень сильно зарастающие – >75% [13].

Результаты исследования

В составе макрофитов реки Волгуши было обнаружено 12 видов растений, относящихся к 9 семействам и трем экологическим группам (рис. 2). Лидирующую позицию по числу видов занимает семейство *Potamogetonaceae*, представленное тремя видами. Семейство *Cyperaceae* насчитывает 2 вида. Оставшиеся семейства представлены единичными видами.

Самой многочисленной экологической группой макрофитов являются гелофиты. В данной группе насчитывается порядка 6 видов (41%). К ним относятся: *Polygonum amphibium*, *Caltha palustris*, *Scirpus lacustris*, *Carex nigra*, *Phragmites australis*, *Sagittaria sp* (рис. 3).

К погруженным гидрофитам относятся 3 вида, что составляет 25% от общего количества видов. В эту группу входят: *Elodea canadensis* (рис. 4), *Potamogeton pectinatus*, *Potamogeton crispus*.

В группе гидрофитов с плавающими листьями так же насчитывается порядка 3 видов (25%). К ним относятся: *Spirodela polyrhiza*, *Potamogeton natans*, *Nuphar lutea*.

Исследования показали, что распространение, степень развития и видовой состав макрофитов в р. Волгуше зависит от экологических условий на створах наблюдения. Основными факторами распространения и развития гидрофлоры являются грунт, прозрачность воды, скорость потока, его глубина, затенённость русла, заболоченность, а также различного рода хозяйственно-бытовая деятельность на водосборе. Скорость течения реки – один из определяющих факторов видового состава макрофитов. На станциях с быстрым течением состав гидрофлоры намного беднее, чем на станциях с замедленным течением.

Первый створ располагается в 5 км от истока р. Волгуши. В среднем ширина реки на данной станции составляет 1,3–1,8 м, глубина колеблется от 0,6 до 0,9 м, скорость течения 0,01 м/с, дно илистое. Вода мутная с желтоватым оттенком. Водная растительность представлена преимущественно такими видами, как

Elodea canadensis, *Potamogeton natans*, *Sagittaria sp.* Зарастаемость реки на данном участке в большей степени определяется развитием сообщества *Elodea canadensis* и составляет 30%, что означает умеренную степень загрязнения (табл. 1).

Второй створ находится в зоне влияния автотрассы (А 107) Московского малого кольца. Ширина реки здесь составляет 1,5–1,7 м,

глубина 0,6–0,7 м, скорость течения 0,5 м/с, дно так же илистое. Вода мутно-коричневого цвета. Водная растительность представлена преимущественно гелофитами: *Polygonum amphibium*, *Carex nigra*, *Scirpus lacustris*. Также наблюдаются небольшие сообщества *Elodea canadensis* и *Potamogeton natans*. Зарастаемость реки на данной станции составляет 30%.

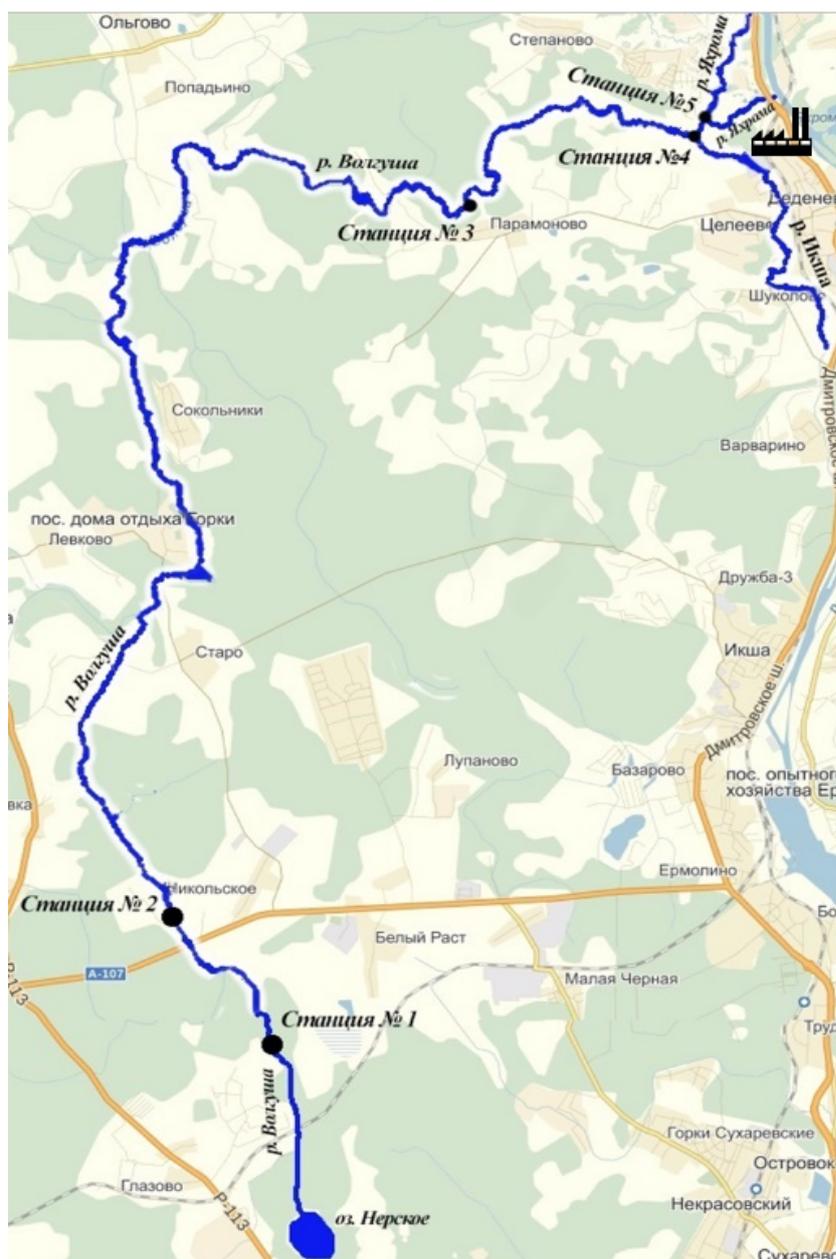


Рис. 1. Схема расположения створов на р. Волгуше:

1 – в 5 км от истока р. Волгуши; 2 – в зоне влияния автотрассы (А 107) Московского малого кольца; 3 – в нескольких километрах от деревни Парамоново; 4 – в месте впадения р. Икшанки со сточными водами с очистных сооружений в р. Волгушу (п. Деденево); 5 – устье р. Волгуши, место впадения в р. Яхрому

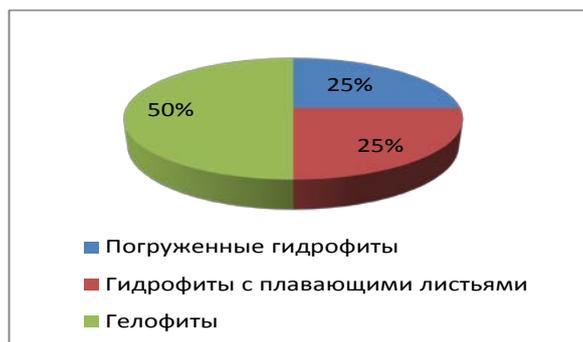


Рис. 2. Распределение макрофитов р. Волгуши по экологическим группам

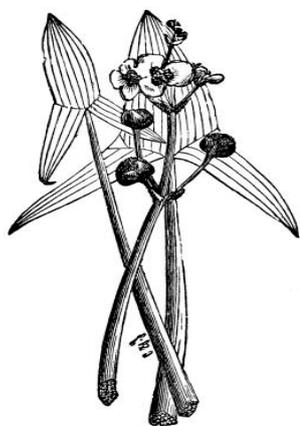


Рис. 3. *Sagittaria sagittifolia* [9]

Створ три находится в нескольких километрах от деревни Парамоново. Ширина реки 3,5–3,7 м, глубина 0,4–0,5 м, скорость течения реки достигает 3–3,5 м/с, дно песчано-каменистое. Вода прозрачная, без каких-либо запахов. На данной станции р. Волгуши в растительном биоценозе преобладают погруженные гидрофиты, такие как *Potamogeton crispus* и гидрофиты с плавающими листьями *Nuphar lutea*, *Spirodela polyrrhiza*. Гелофиты *Phragmites australis*, *Sagittaria sp.*, *Carex nigra* отмечены вдоль береговой линии в незначительном количестве. Основной вклад в зарастание реки на данной станции вносит *Potamogeton crispus*, зарастаемость составляет 25%.

Четвертый створ располагается в месте впадения р. Икшанки в р. Волгушу. Ширина реки на данном участке достигает 4,1–4,5 м, глубина 0,6–0,8 м, скорость течения снижается до 0,06 м/с, грунты представлены иловыми отложениями. Существуют наиболее благоприятные условия для развития водной растительности. Макрофиты в основном представлены видами из семейства *Potamogetonaceae*, а также

отдельными представителями других семейств. Зарастаемость реки на данной станции составляет 45%, что в пределах умеренного зарастания.



Рис. 4. *Elodea canadensis* [9]

Пятый створ – устье реки (место впадения р. Волгуши в р. Яхрому). Ширина реки здесь 2,5–3 м, глубина 0,7–0,8 м, скорость течения 0,03 м/с, дно песчаное с небольшим наилоком. На данном участке наблюдается наибольшее разнообразие гелофитов: *Sagittaria sp.*, *Typha angustifolia*, *Polygonum amphibium*. А также отмечены представители погруженных гидрофитов: *Potamogeton crispus*, *Potamogeton pectinatus*. Зарастаемость реки составляет порядка 40%, что соответствует значению «умеренное зарастание».

Зарастаемость р. Волгуши в целом составляет около 35%, что соответствует умеренному зарастанию [13]. Следует отметить фрагментарный тип распределения растительности. Гидрофлора формируется в основном вдоль берегов.

Таблица 1. Распределение макрофитов в р. Волгуше

Вид макрофитов	Сапробность	S	Станция				
			1	2	3	4	5
Семейство Hydrocharitaceae							
<i>Elodea canadensis</i> Michx.	β	1,8	+	+			+
Семейство Potamogetonaceae							
<i>Potamogeton crispus</i> L.	β	1,8			+	+	+
<i>Potamogeton pectinatus</i> L.	α-β	1,6				+	+
<i>Potamogeton natans</i> L.	β	1,6	+	+		+	
Семейство Nymphaeaceae							
<i>Nuphar lutea</i> L.	β-о	1,7			+	+	
Семейство Lemnaceae							
<i>Spirodela polyrrhiza</i> L.	β	2,0			+	+	
Семейство Poaceae							
<i>Phragmites australis</i> (Cav) Trin. Ex Steud.	β-о	1,4	+		+	+	
Семейство Alismaceae							
<i>Sagittaria</i> sp.	о-β	1,4	+		+		+
Семейство Typhaceae							
<i>Typha angustifolia</i> L.	β	1,4		+		+	+
Семейство Cyperaceae							
<i>Carex nigra</i> L.	β	1,8		+	+	+	
<i>Scirpus lacustris</i> L.	α-β	1,8		+		+	
Семейство Polygonaceae							
<i>Polygonum amphibium</i> L.	β	2,4		+			+

Существуют предположения [3], что те или иные виды макрофитов могут выдерживать разную степень загрязнения. Ряд авторов отмечают, что некоторые виды макрофитов (к ним относятся и гидрофлора р. Волгуши) могут служить показателями конкретного состояния и трофности водоемов. Развитие *Lemna minor* и *Spirodela polyrrhiza*, помимо эвтрофирования, указывает на сельскохозяйственное загрязнение, а их локальное интенсивное развитие указывает на места поступления биогенных элементов в водоемы [11; 12].

Так, *Spirodela polyrrhiza* обильно произрастает в условиях четвертого створа, находящегося в зоне влияния очистных сооружений п. Деденево и отличающегося высокой степенью эвтрофности.

Высокоинтенсивное развитие *Elodea canadensis* указывает на то, что вода имеет слабощелочную реакцию среды [11], рН воды на исследуемых створах р. Волгуши, где обильно развивается этот макрофит, равен 7,8–8,1.

Обильное развитие рдеста гребенчатого (*Potamogeton pectinatus*) является показателем наличия сточных вод, а также водоемов с высокой жесткостью воды: в р. Волгуше в большом

количестве он встречается на четвертом и пятом створах, где происходит сброс сточных вод и вынос их вниз по течению. Жесткость воды на этих участках реки 7,7–8,3 °Ж, что свидетельствует о жесткости воды, близкой к высокой [4].

Определение качества воды в р. Волгуше по флористическому составу не представляется возможным, поскольку отдельные створы реки весьма различаются по гидрологическим параметрам и степени антропогенного воздействия, что, безусловно, оказывает влияние на состав и характер распространения гидрофитоценозов. К тому же их относительно малое разнообразие на отдельных створах реки также не позволяет оценивать качество воды по видовому разнообразию.

Поэтому для определения качества воды в р. Волгуше был использован сапробиологический анализ – оценка степени загрязненности вод по индикаторным организмам.

Оценивая сапробность макрофитов р. Волгуши по имеющимся видам-индикаторам, установлено преобладание β-мезосапробов – 58%, о-β-мезосапробы составили 8%, на о-β, α-β-мезосапробов приходится по 17% (рис. 5).

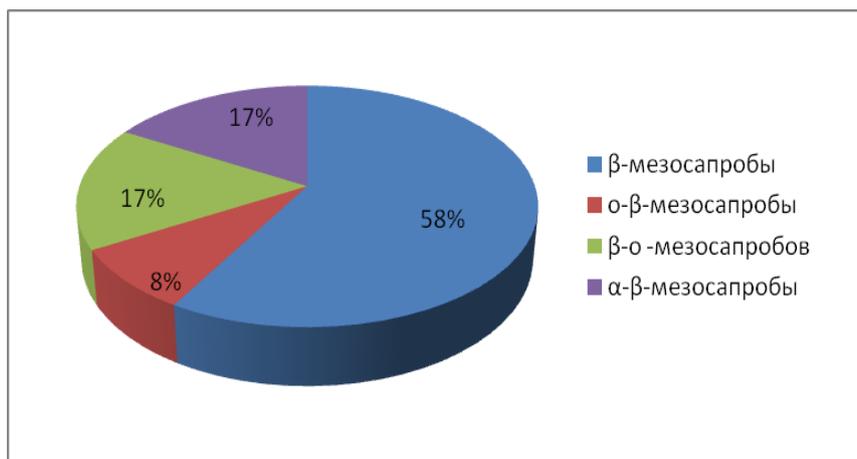


Рис. 5. Распределение макрофитов р. Волгуши по сапробности

Также для оценки качества воды по макрофитам был использован индекс сапробности Р. Пантле и Н. Букка [11; 16] по модификации А.П. Садчикова и М.А. Кудряшова (2004).

Расчеты индекса сапробности на разных створах р. Волгуши показал, что от исто-

тока к устью качество воды в реке соответствует β-мезосапробной зоне (табл. 2).

В целом полученные результаты нашли подтверждение по данным основных гидрохимических и гидробиологических показателей, представленных в работах по оценке экологического состояния р. Волгуши [4; 6].

Таблица 2. Оценка качества воды в р. Волгуше по макрофитам

№ станции	$\sum sh$	$\sum h$	S	Зона сапробности
1	16	8	2,0	β-мезосапробная
2	24,2	13	1,9	β-мезосапробная
3	17	12	1,6	β-мезосапробная
4	39,4	24	1,6	β-мезосапробная
5	30	16	1,9	β-мезосапробная

Выводы

1. В составе макрофитов р. Волгуши было обнаружено 12 видов растений, относящихся к 9 семействам и трем экологическим группам. Самой многочисленной экологической группой макрофитов являются гелофиты. В данной группе насчитывается порядка 6 видов.

2. В целом зарастаемость р. Волгуши составляет около 35%, что соответствует умеренному зарастанию. Отмечается фрагментарный тип распределения растительности. Гидрофлора формируется в основном вдоль берегов.

3. Расчеты индекса сапробности на разных створах р. Волгуши показал, что от истока к устью качество воды в реке соответствует β-мезосапробной зоне.

Библиографический список

1. Анищенко Л.Н., Буховец Т.Н. Настоящие водные макрофиты как аккумуляторы элементов// Экологическая безопасность региона: материалы Международной научно-практической конференции (Россия, Брянск, 29–30 октября 2009 г.). Брянск: Курсив, 2009. С. 38–42.
2. Гагарина О.В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы. Ижевск: Удмуртский университет, 2012. 199 с.
3. Груздева Л.П. Биоиндикация качества природных вод// Биология в школе. 2002. № 6. С. 10–14.
4. Иванова А.И., Кузнецова Н.В., Лазарева Г.А. Гидрохимическая оценка состояния реки Волгуши // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1, № 2. С. 82–102.

5. Кокин К.А. О роли погруженных макрофитов в самоочищении загрязненных вод// Тр. ВГБО. 1963. Т.14.
6. Кузнецова Н.В., Иванова А.И., Коротенко В.П. Оценка экологического состояния основного водного объекта ООПТ «Долина р. Волгуши и Парамоновский овраг» методами биоиндикации// Использование и охрана природных ресурсов. 2017. № 4 (152). С. 58–63.
7. Макрушин А.В. Биологический анализ качества вод/ под ред. Г. Г. Винберга; АН СССР. Зоол. ин-т. Всесоюз. гидробиол. изд-во. Ленинград: [б. и.], 1974. 60 с.
8. Материалы комплексного экологического обследования участков территории, обосновывающие придание этой территории правового статуса особо охраняемой природной территории областного значения государственного природного заказника «Долина р. Волгуша и Парамоновский овраг». Природоохранный фонд «Верховье», 2016. 52 с.
9. Морузи И.В., Пищенко Е.В., Веснина Л.В. Практикум по гидробиологии. Новосибирск: Новосибир. гос. аграр. ун-т, 2016.
10. Никаноров А.М. Комплексные оценки качества поверхностных вод. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 139 с.
11. Садчиков А.П., Кудряшов М.А. Гидробиотаника: прибрежно-водная растительность. М.: Академия, 2005. 240 с.
12. Садчиков А.П., Кудряшов М.А. Экология прибрежно-водной растительности. М.: Изд-во НИИ Природы, 2004. 220 с.
13. Синкявичене З.В. Характеристика растительности малых и средних рек Литвы: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Вильнюс, 1992. 28 с.
14. Унифицированные методы исследования качества вод. Ч. III: Методы биологического анализа. М.: СЭВ, 1977.
15. Kelly M.G. Biological monitoring of eutrophication in rivers// Hydrobiologia. 1998. № 384. P. 55–67.
16. Pantle R. Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse// Gas- und Wasserfach. 1955. Bd 96, № 18. P. 604–618.

Поступила в редакцию
26.05.2018

УДК 539.1.07

С. В. Казарцев, В. Г. Егоров**Стенд для исследования свойств сцинтилляционных материалов**

Описан стенд для исследования и сравнения свойств различных сцинтилляторов. Стенд включает в себя несколько фотоэлектронных умножителей, светонепроницаемую камеру для исследуемых сцинтилляционных образцов (в том числе жидких), мюонный телескоп, управляемый светодиод подсветки, набор радиоактивных источников и электронику для обработки сигналов. Стенд позволяет измерять функцию отклика исследуемых сцинтилляторов на облучение α -частицами, электронами, γ -лучами и нейтронами различных энергий, а также космическими мюонами.

Ключевые слова: сцинтиллятор, ФЭУ, световыход, квенчинг-фактор, нейтроны, функция отклика, мюонный телескоп.

Об авторах

Егоров Вячеслав Георгиевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий и новых материалов государственного университета «Дубна», начальник сектора научно-экспериментального отдела ядерной спектроскопии и радиохимии лаборатории ядерных проблем.

Казарцев Сергей Вячеславович – младший научный сотрудник научно-экспериментального отдела ядерной спектроскопии и радиохимии лаборатории ядерных проблем, магистрант кафедры нанотехнологий и новых материалов государственного университета «Дубна». *E-mail:* kazarcevs@gmail.com. 141981 г. Дубна, ул. Университетская 19/1, к. 301.

Для регистрации радиоактивного излучения существует множество детекторов. Одним из классов таких приборов являются сцинтилляционные детекторы. Их принцип основан на регистрации света при попадании ионизирующей частицы в тело сцинтиллятора. Для регулярного исследования свойств сцинтилляторов нами был создан экспериментальный стенд, который позволял бы измерять такие характеристики, как относительный световыход, эффективность регистрации, квенчинг-фактор. Стенд позволяет работать с различными типами излучений: α -, β -, γ -, мюоны и нейтроны.

Общие сведения

На рис. 1 показано устройство нашего стенда. «Шкаф» разделен на три независимые, герметичные от света секции. ФЭУ #3 используется для исследования свойств образцов сцинтилляторов и одновременно является предметным столиком. Управление питанием тремя ФЭУ находится в этом же «шкафу», причем на дисплей выводится значение напряжения каждого ФЭУ, влажность и температура в центральной камере.

(ФЭУ #1 + Пл #1) и (ФЭУ #2 + Пл #2) яв-

ляются полноценными детекторами частиц и используются для регистрации космических мюонов. Для проведения измерений с мюонами эти детекторы включаются на схему совпадений, что дает возможность выделить из всего потока только треки от вертикальных мюонов. Мюоны, попавшие в телескоп, могут пройти мимо исследуемого образца, что дает нам спектральный пик, соответствующий нулевой энергии. Если же мюон проходит через исследуемый сцинтиллятор, он теряет энергию по всему объему образца. Получаемый спектр соответствует энерговыделению от релятивистских мюонов и описывается распределением Ландау. По этому спектру производится калибровка энергетической шкалы при энергиях выше 2–3 МэВ.

Для калибровки при меньших энергиях используются γ -линии (или их комптоновские границы) 661 кэВ от ^{137}Cs , 1173 кэВ и 1332 кэВ от ^{60}Co и 2614 кэВ от ^{228}Th . Для их установки внутри центральной секции «шкафа» расположен штатив для радиоактивных источников. Следует отметить, что если образец сцинтиллятора имеет низкое значение Z атомов, входящих в его состав, то пик полного поглощения в спектре отсутствует, но проявятся комптоновские края.

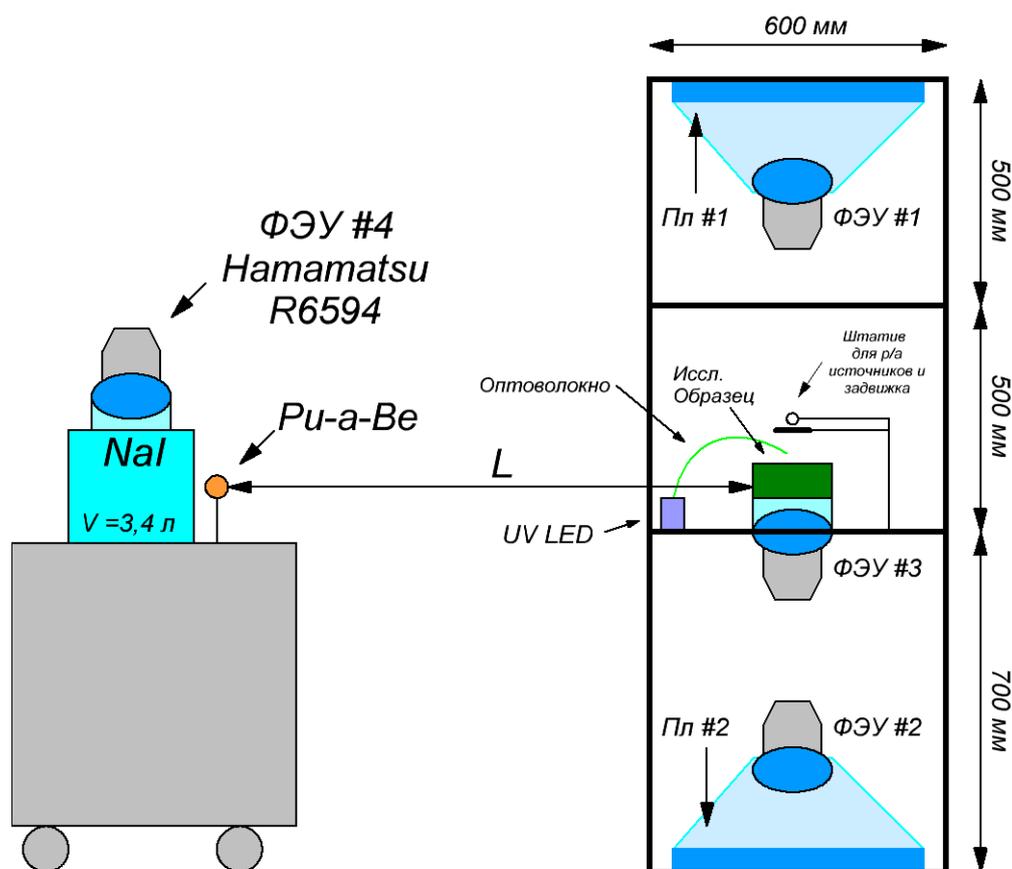


Рис. 1. Упрощенная схема стенда: ФЭУ – фотоэлектронный умножитель (*Hamamatsu R6594*); Пл – сцинтилляционная пластина

Еще одним перспективным источником является ^{207}Bi , который, помимо γ -излучения с энергиями 569 кэВ и 1063 кэВ, испускает монохроматические электроны, обусловленные внутренней конверсией. Энергия этих электронов равняется энергии γ -перехода минус энергия связи электрона соответствующей оболочки. В отличие от γ -лучей, эффективность регистрации электронов близка к 100% независимо от Z образца. Если поместить между источником и образцом тонкую заслонку, то электроны будут полностью отсечены, а γ -излучение – нет. Разностный спектр соответствует электронам внутренней конверсии.

Работа с источниками α -частиц более сложна. Дело в том, что α -частицы имеют большую ионизирующую способность, и потому их пробеги в веществе не превышают десятой доли миллиметра. Наличие любого мёртвого слоя на их пути ведет к неконтролируемой потере энергии и сильному искажению конеч-

ного результата. Даже воздух между образцом и источником делает измерение неточным.

Еще более сложной является работа с нейтронами, получаемыми от $\text{Pu-}\alpha\text{-Be}$ источника. Нейтроны в нем образуются в результате реакции $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}^*$. α -частицы перед взаимодействием с ядрами ^9Be проходят слой вещества случайной толщины, и угол между импульсами α -частицы и нейтрона также случаен, поэтому энергия испускаемых нейтронов не постоянна и лежит в промежутке приблизительно от 100 кэВ до 12 МэВ. Эту энергию можно определить по времени пролета нейтрона от источника до образца-сцинтиллятора. При этом стартом служит регистрация сопутствующего γ -излучения от $^{12}\text{C}^*$ (4,4 МэВ), а стопом – сигнал от исследуемого образца. Пролетная база при этом может устанавливаться от 30 см до 3 метров, что соответствует временам в диапазоне нескольких наносекунд до микросекунды.

Для того, чтобы обеспечить возможность измерения абсолютного количества образовавшихся на фотокатоде фотоэлектронов по методу, описанному в [1], в состав стенда входит ультрафиолетовый светодиод, управляемый внешними импульсами.

Для проведения экспериментов с жидкими сцинтилляторами на адаптер ФЭУ #3 устанавливается кювета соответствующего размера, при выборе которого следует учитывать неоднородность фотокатода ФЭУ и возможную неоднородность светосбора в кювете.

Система накопления данных

В зависимости от решаемой задачи логика работы системы накопления данных может сильно отличаться. Например, для сравнения относительного световыхода образцов сцинтилляторов достаточно измерять одиночный энергетический спектр с ФЭУ #3. Если нужны измерения в абсолютной энергетической шкале, то необходимо калибровать ее с помощью сигналов от ФЭУ #1 и ФЭУ #2. При работе с нейтронами необходимо измерять еще и время между сигналами. Все эти возможности в данном стенде изначально заложены, и переход между режимами накопления осуществляется простым переключением тумблеров на блоках (рис. 2).

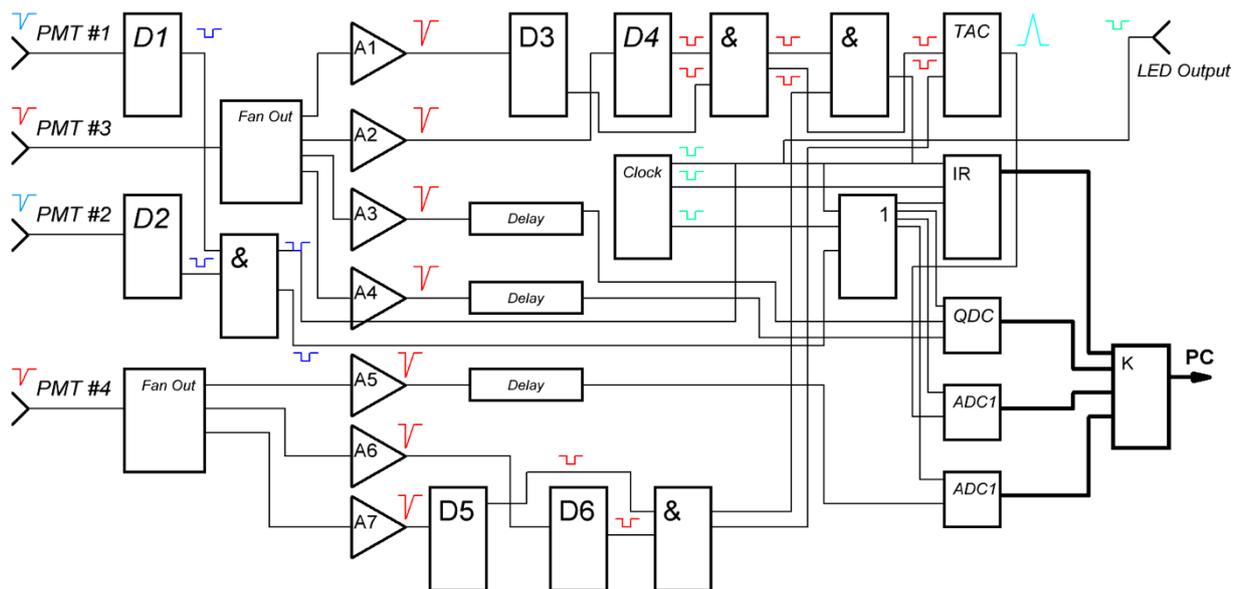


Рис. 2. Блок-схема системы накопления данных:

D – дискриминатор; *FAN OUT* – разветвитель сигналов; *A* – усилитель; 1 – схема ИЛИ; & – схема И; *QDC* – аналого-цифровой преобразователь; *Clock* – генератор; *LED Output* – выход на светодиод; *ADC* – аналого-цифровой преобразователь; *TAC* – конвертер время–амплитуда; *IR* – входной регистр; *K* – контроллер ПК

Примеры полученных результатов

Наиболее важной характеристикой любого сцинтиллятора является световыход. При решении научных задач чаще всего используют его относительное значение, определяемое как отношение амплитуды импульсов от сцинтилляционного детектора излучения к аналогичному параметру другого сцинтилляционного детектора в идентичных условиях измерения.

На рис. 3 показаны полученные энергетические спектры электронов от ^{207}Bi , измеренные сцинтиллятором на основе ЛАБ с разной степенью очистки. Положение пиков одной и той же энергии оказывается различным и зависит от качества сцинтиллятора. Именно разница в положении пика численно характеризует значение относительного световыхода.

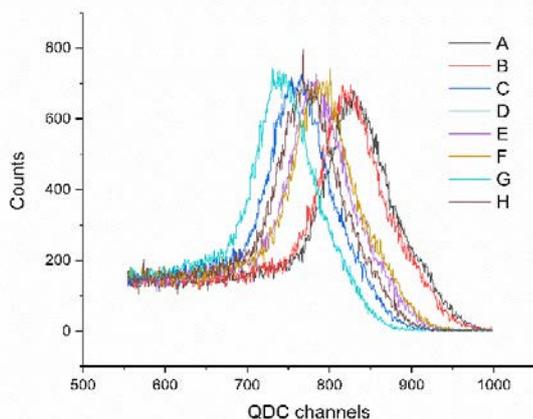


Рис. 3. Спектры ЭВК ^{207}Bi , полученные на сцинтилляторе ЛАБ с различной степенью очистки

При проведении измерений с α -частицами выяснилось, что величина регистрируемого светового сигнала сильно зависит от положения источника. На рис. 4 показаны спектры при различной глубине погружения имплантированного источника ^{242}Pu в жидкий сцинтиллятор. Объяснить смещение пика можно тем, что α -частица вызывает сцинтилляцию в очень маленькой области и представляет собой фактически точечный источник света в отличие от других излучений, дающих свет в среднем по всему объему сцинтиллятора. Поскольку эффективность светосбора из разных точек различна, то и величина зарегистрированного светового сигнала тоже отличается. Если для мюонов или γ -излучения сигнал усредняется по всему объему, то для α -частиц этого не происходит, и зависимость сигнала от положения α -источника остается.

Таким образом, для измерения относительного световыхода с α -источником необходимо жестко фиксировать его положение внутри кюветы. Если же задача предполагает сравнение спектров от различных излучателей с одинаковой геометрией энерговыделения (например, при измерении квенчинг-фактора), то следует проводить измерение с α -источником, растворенным в сцинтилляторе, – в такой постановке энерговыделение будет однородным по всему объему, как это имеет место в случае мюонов или жесткого гамма-излучения.

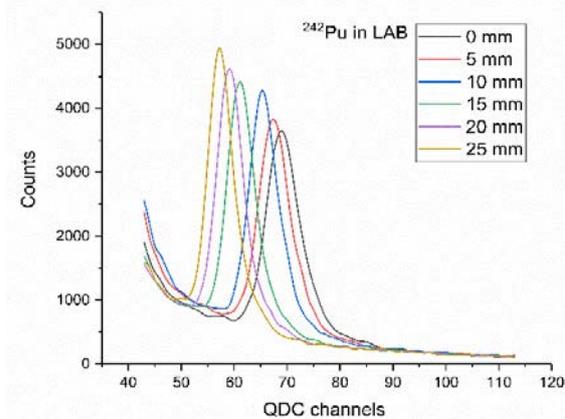


Рис. 4. Спектры ^{242}Pu , полученные на сцинтилляторе ЛАБ с различной глубиной погружения источника

Как уже говорилось выше, измерения с нейтронами требуют особого подхода. Поскольку энергетический спектр $\text{Pu}-\alpha\text{-Be}$ источника непрерывен, то каждый нейтрон имеет свою неизвестную *a priori* энергию, определить которую можно лишь по времени пролета известной базы. Для этого вся информация записывается не в виде спектров, а в виде отдельных событий – “event-by-event”, которые затем подлежат сортировке в режиме *off-line*. Каждое событие включает в себя энергию E_γ , зарегистрированную выносным γ -детектором NaI, энергию E_n , выделившуюся в исследуемом образце при попадании в него нейтрона, и время между этими сигналами $T_{\gamma n}$. Кроме того, в событие заносится информация о наличии космического мюона (в этом случае событие считается калибровочным). На рис. 5 показан пример двумерного распределения количества событий от E_n и $T_{\gamma n}$.

На рис. 5 область “a” соответствует фоновым событиям, когда в исследуемый сцинтиллятор попадает не нейтрон, а γ -квант, рассеявшийся перед этим в γ -детекторе. Поскольку он движется со скоростью света, то время $T_{\gamma n}$ для этих событий составляет примерно 5 нс. Самые быстрые из нейтронов ($E=12$ МэВ) долетают до образца за 31 нс (область “b”), нейтроны с наиболее вероятной энергией ~ 5 МэВ – за 50 нс (область “c”), с энергией в 1 МэВ – за 108 нс и т.д. Асимптотическая область “d” соответствует случайным совпадениям сигналов, распределение которых в первом приближении равномерно во времени.

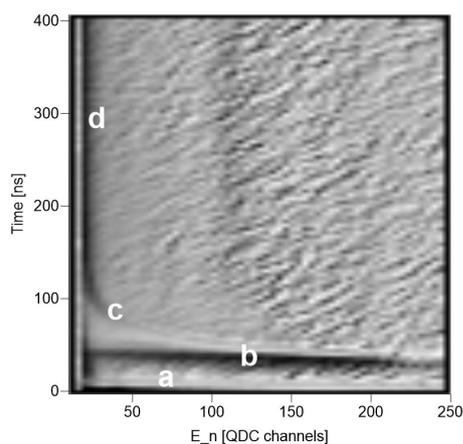


Рис. 5. Двумерное распределение количества событий от от E_n и T_{7n} при базе $L=1.5$ м

Заключение

Собранный нами стенд находится в научно-экспериментальном отделе ядерной спектроскопии и радиохимии Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и в настоящее время используется

для исследования свойств сцинтилляторов на основе ПАБ и ЛАБ, предназначенных для нейтринных экспериментов *Daya Bay* [2] и *NOvA* [3].

Авторы выражают благодарность сотрудникам НЭОЯСиРХ ЛЯП ОИЯИ за практическую помощь в создании стенда.

Библиографический список

1. Bellamy E.H., Bellettini G., Budagov J. et al. Absolute calibration and monitoring of a spectrometric channel using a photomultiplier// Nucl. Instr. Meth. A339. 1994. P. 468–476.
2. Ann F.P. et al. Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay// Phys. Rev. Lett. 108, 171803. Published 23 April 2012.
3. Ayres D.S. et al. The NOvA Technical Design Report// Fermilab-Design. 2007. V. 01. 1–600.

*Поступила в редакцию
26.05.2018*

УДК 544.723.54

В. С. Пискунова, Р. В. Новичков, Б. К. Зуев**Окситермография в качестве нового метода оценки модификации поверхности наночастиц диоксида кремния 3-аминопропилтриэтоксисиланом**

Функционализированные коллоидные частицы диоксида кремния находят широкое применение в современной науке и различных отраслях промышленности. Повышенный интерес исследователей к модифицированным наночастицам объясняется наличием у них уникальных физических и химических свойств. Свойства описываемых систем зависят от состава, структуры и плотности поверхностного привитого слоя, а также от размера частиц. Частицы с модифицированной поверхностью все шире используются в качестве химических катализаторов, биосенсоров, неподвижных фаз в хроматографии, наполнителей полимеров, биологических и медицинских препаратов.

При проведении модификации необходимо контролировать химический процесс на твердой поверхности. Существует несколько подходов для анализа наночастиц с привитыми поверхностными структурами [3]. В данной работе для определения качества прививки 3-аминопропилтриэтоксисилана (АППЭС) впервые использовалась термоокислительная спектроскопия – окситермография [4]. Особенность выбранного метода заключается в том, что формирование аналитического сигнала осуществляется за счет окисления органического вещества в потоке воздуха. Таким образом, при использовании окситермографа регистрировали изменение (уменьшение) содержания кислорода в потоке воздуха, выходящего из высокотемпературного реактора, при программируемом окислении химически привитого модификатора на поверхности наночастиц SiO_2 . Этот метод обладает рядом преимуществ. Например, при использовании воздуха в качестве окислительной среды не требуется никаких расходных реагентов, а сам анализ не требует много времени.

Целью настоящей работы являлось изучение возможности применения метода окситермографии в анализе кинетики хемосорбции 3-аминопропилтриэтоксисилана на поверхности наночастиц кремнезема [1].

Наночастицы диоксида кремния получали методом Штобера–Финка–Бона [6]. Выбор в качестве модификатора 3-аминопропилтриэтоксисилана обусловлен наличием аминогрупп в составе его молекулы, которые могут легко протонироваться, изменяя заряд поверхности кремнезема. Для подбора оптимальных условий модификации поверхности частиц SiO_2 была исследована кинетика данного процесса с использованием различных методов: микроэлектрофорез с определением дзета-потенциала и окситермография. Методом окситермографии также была проведена количественная оценка хемосорбции модификатора.

Ключевые слова: наночастицы, диоксид кремния, кремнезем, 3-аминопропилтриэтоксисилан, окситермография, дзета-потенциал.

Об авторах

Пискунова Василина Сергеевна – студент 2-го курса магистратуры, Институт геохимии и аналитической химии РАН им. В.И.Вернадского, и.о. инженера-исследователя; лаборант на кафедре химии, новых технологий и материалов государственного университета «Дубна». E-mail: wasilina5.ru@mail.ru. Г. Кимры, ул. Льва Толстого, д. 83.

Новичков Роман Владимирович – кандидат химических наук, доцент, ФГУП «Научно-исследовательский институт прикладной акустики», старший научный сотрудник.

Зуев Борис Константинович – доктор технических наук, профессор, Институт геохимии и аналитической химии РАН им. В.И. Вернадского, заведующий лабораторией химических сенсоров и определения газообразующих примесей.

Экспериментальная часть**Описание установки**

Метод окситермографии основан на программированном высокотемпературном окислении образца в потоке бинарной смеси газов

(кислород–инертный газ) или атмосферного воздуха и количественном определении кислорода, затраченного на окисление привитых слоев. Аналитическим сигналом является площадь отрицательного пика, которая показывает количество кислорода, израсходованного на окисление образца. Регистрация кислорода в потоке газа, выходящего из окислительного высокотемпературного реактора, осуществля-

ется с помощью твердоэлектrolитной ячейки. Стандартная твердоэлектrolитическая ячейка (ТЭЯ) представляет собой пробирку из диоксида циркония, на внутреннюю и внешнюю поверхности которой нанесены электроды из мелкодисперсной платины. Получаемая в ходе регистрации окситермограмма несет информацию о структуре органического вещества и может использоваться для их идентификации в исследуемом образце. Этот относительно простой

автоматизированный метод дает наиболее низкие пределы обнаружения органического вещества на фоне неорганической матрицы. С помощью окситермографии можно уверенно обнаруживать в образцах до 10^{-5} г органического вещества [7]. Поэтому для качественного и количественного исследования привитых слоев на поверхности наночастиц кремнезема выбран метод окситермографии. На рис. 1 представлена схема окситермографа.

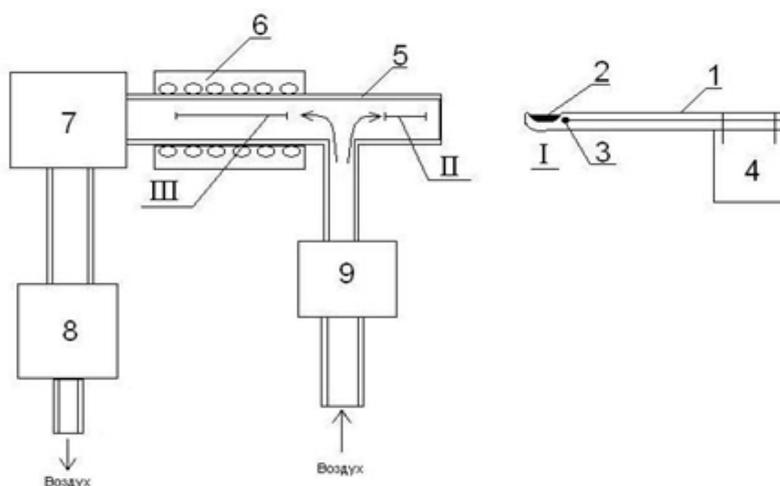


Рис. 1. Схема окситермографа:

1 – кварцевая лодочка; 2 – ёмкость для образца; 3 – термопара внутри лодочки; 4 – система перемещения лодочки; 5 – кварцевый реактор; 6 – высокотемпературный нагреватель; 7 – датчик концентрации кислорода; 8 – побудитель потока газа; 9 – компрессор; I – положение лодочки для введения пробы; II – положение лодочки, где осуществляется удаление летучих компонентов пробы; III – высокотемпературная область

Анализируемый образец, находящийся на поверхности лодочки, с помощью системы перемещения вводится в высокотемпературный реактор, через который прокачивается смесь газа с заранее заданным парциальным давлением кислорода (в данном случае воздух). На выходе из реактора ставится датчик (сенсор) кислорода, который непрерывно контролирует содержание кислорода, выходящего из реактора. По мере поступления анализируемого образца в реактор происходит его нагрев и окисление органического вещества кислородом, находящимся в потоке газа. Датчик кислорода фиксирует уменьшение содержания кислорода, выходящего из реактора. На графике зависимости концентрации кислорода от времени появляется отрицательный пик, который характеризует количество кислорода, затраченного на окисление вещества, находящегося в образце.

Данный метод обладает рядом преимуществ. Измерения занимают не больше 15 минут. Программа, управляющая системой перемещения лодочки с образцом, позволяет создавать широкий спектр температурных профилей нагрева образцов. Это обеспечивается тем, что по мере поступления лодочки с образцом в реактор лодочка попадает в различные температурные зоны реактора, что также расширяет аналитические возможности установки. Метод окситермографии позволяет анализировать сорбционные слои на твердых поверхностях различных носителей [7].

Описание эксперимента

Наночастицы диоксида кремния получали методом Штобера–Финка–Бона. В колбу на 1 литр при перемешивании и термостатировании добавляли 500 мл этилового спирта, 15 мл водного раствора аммиака, который является

катализатором формирования сферических частиц, и 30 мл тетраэтоксисилана. Реакционную смесь выдерживали 5 часов для окончательного роста и формирования частиц.

Размер сферических частиц дисперсной фазы приготовленного золя анализировался на приборе *Nanotracs* и составил 170 нм (рис. 2).

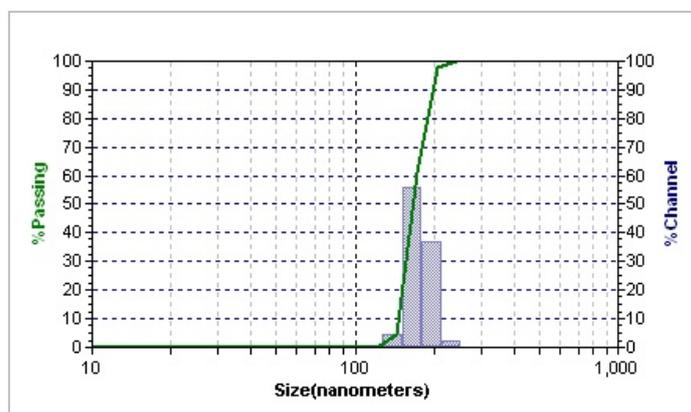


Рис. 2. Распределение по размерам частиц SiO₂, средний размер – 170 нм

Перед измерением дзета-потенциала из полученной дисперсии отгоняли аммиак. Значение ζ-потенциала немодифицированных частиц кремнезема в водной дисперсии при pH = 8,8 составило –33,6 мВ. Знак «минус» свидетельствовал о преобладании анионных форм -Si-O⁻ на твердой поверхности дисперсной фазы, а величина электрокинетического потенциала – о стабильности полученного золя.

Расчет количества АПТЭС производили исходя из предположения, что одна поверхностная -Si-OH-группа взаимодействует с одной молекулой модификатора. В силу того, что молекула модификатора содержит три якорные группировки, возможность взаимодействия по

оставшимся якорным группам была учтена и признана стериически маловероятной ввиду расположения -ОН-групп на поверхности SiO₂ (~4,8 ОН-групп/нм² [5]). Исходя из удельной площади поверхности частиц дисперсной фазы, рассчитали максимально возможные количества модификатора для одной частицы. Расчет также показал, что для частиц размером 170 нм на 50 мл золя количество АПТЭС составил 8,7·10⁻⁵ моль. На рис. 3 представлена простейшая схема взаимодействия гидроксированной поверхности наночастиц диоксида кремния с молекулой модификатора.

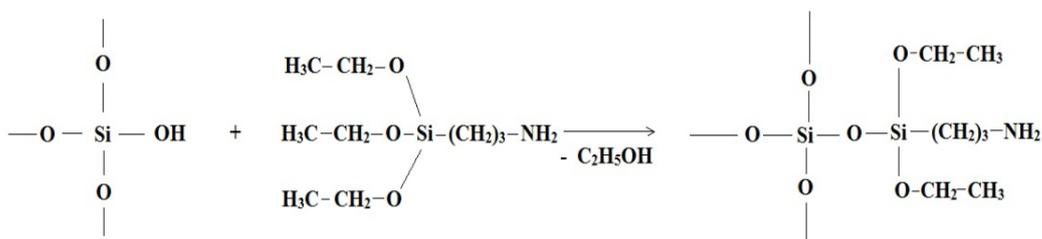


Рис. 3. Схема взаимодействия поверхности наночастиц диоксида кремния с молекулой 3-аминопропилтриэтоксисилана

Химическая модификация поверхности наночастиц проводилась при температуре 60 °С и перемешивании реакционной смеси.

Значения дзета-потенциала и рН изоэлектрической точки (рН_{ИЭТ}) дисперсий при различной продолжительности процесса химического модифицирования получены методом микроэлектрофореза на приборе *Malvern ZetaSizer Nano Z*. Время химической модификации поверхности составляло: 0,5, 1, 2, 5, 3, 4, 5, 21, 24, 28, 47 и 50 часов.

Для анализа спиртовых растворов модификатора с целью построения градуировочного

графика на окситермографе был подобран профиль нагрева с режимом отгонки (рис. 4). Профиль нагрева – зависимость положения лодочки от времени при её введении в реактор. Режим отгонки необходим для устранения мешающего влияния растворителя (этилового спирта). Отгонка этилового спирта продолжалась 100 секунд. Были исследованы спиртовые растворы АПТЭС на окситермографе с объемными концентрациями 1, 2, 3, 4 и 5%. Анализировались пробы объемом 8 мкл.

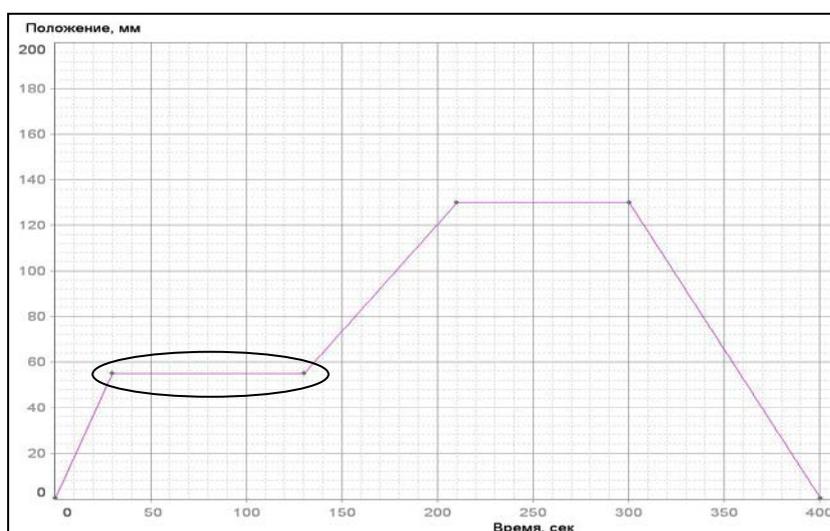


Рис. 4. Профиль движения лодочки окситермографа для отгонки этилового спирта и последующего окисления труднолетучих органических веществ. На рисунке отмечена область (в диапазоне 30–130 сек.), где происходит отгонка легколетучих веществ

По значениям площадей пиков окситермограмм спиртовых растворов АПТЭС построен градуировочный график (рис. 5) и выведено

уравнение, которое связывает концентрацию модификатора и площадь пика окисления.

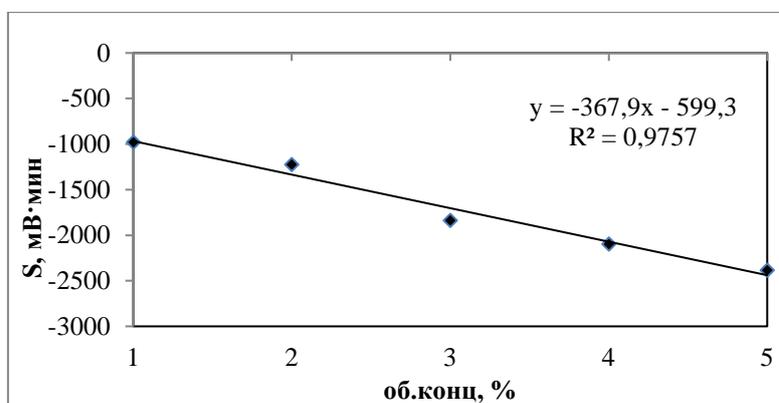


Рис. 5. Градуировочный график по 3-аминопропилтриэтоксисилану

Для анализа высушенных немодифицированных и аминированных частиц диоксида кремния был также подобран профиль нагрева таким образом, чтобы нагрев образцов происходил медленно и равномерно (рис. 6). Чем

медленнее лодочка с образцом входит в высокотемпературную область, тем точнее можно установить температуру окисления привитого модификатора.

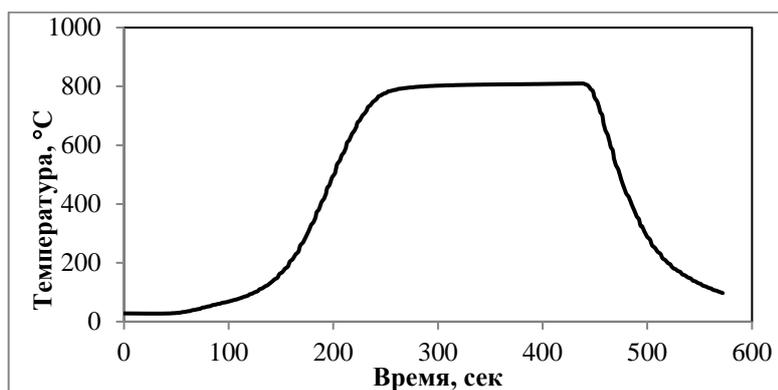


Рис. 6. Температурный профиль нагрева для измерений частиц диоксида кремния

Обсуждение и результаты

На основании проведенной экспериментальной работы были получены дисперсии частиц кремнезема с различным временем модификации. На первом этапе работы оценку сорбционных процессов, происходящих на границе раздела фаз, осуществляли путем анализа измерений электроповерхностных свойств дисперсий (изменение ζ -потенциала и положения $pH_{ИЭТ}$ в сравнении с немодифицированным золем).

$pH_{ИЭТ}$ немодифицированных частиц составил 2,51, что согласуется с литературными данными [5]. В результате хемосорбции АПТЭС на графиках зависимости дзета-потенциала от pH дисперсий (рис. 7) наблюдался сдвиг $pH_{ИЭТ}$ для аминированных частиц диоксида кремния в основную область, что свидетельствовало о специфической сорбции катионной формы модификатора. Таким образом, поверхностные силанольные группы замещались аминогруппами, способными в кислой среде протонироваться с образованием катиона.

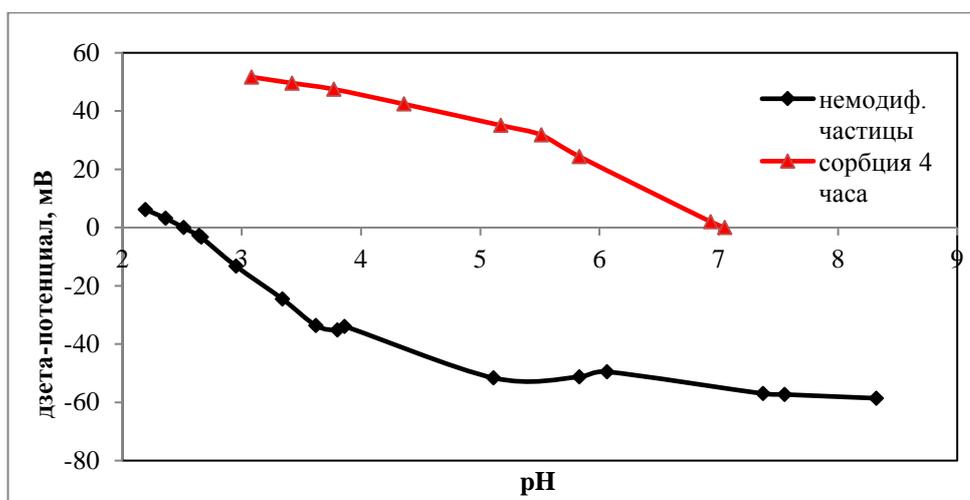


Рис. 7. Графики титрования немодифицированных и модифицированных (4 часа) частиц SiO_2

Из рис. 8 видно, что максимальный сдвиг $pH_{ИЭТ}$ наблюдался при времени модификации 4 часа, а начиная со времени модификации 5 часов значение $pH_{ИЭТ}$ сдвигалось в кислую область, что свидетельствовало об образовании полимолекулярного слоя с при-

сутствием анионных $-SiO^-$ форм. Следовательно, оптимальное время модификации частиц 3-аминопропилтриэтоксисиланом составило 4 часа.

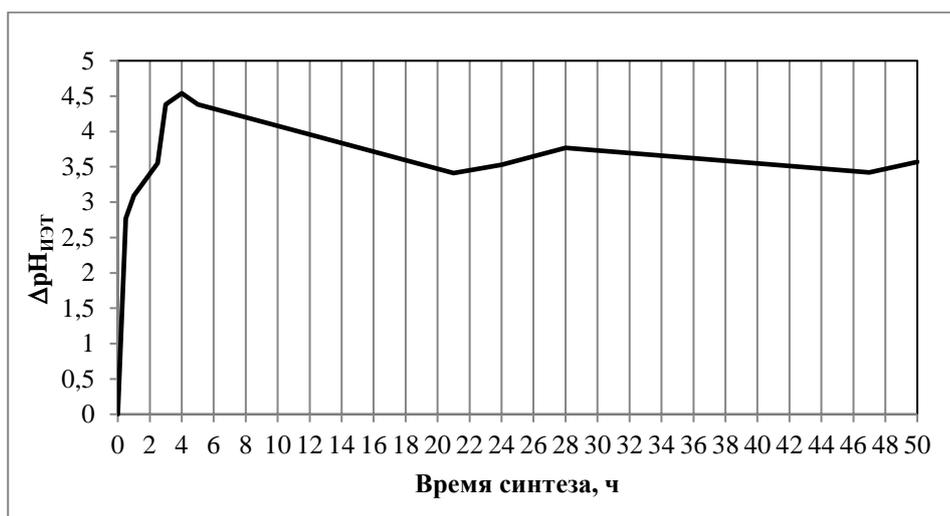


Рис. 8. График зависимости $\Delta pH_{ИЭТ}$ от времени сорбции модификатора

Значение сдвига pH изоэлектрической точки ($\Delta pH_{ИЭТ}$) рассчитывалось следующим образом:

$$\Delta pH_{ИЭТ} = \Delta pH_{ИЭТ} (SiO_2-АПТЭС) - \Delta pH_{ИЭТ} (SiO_2).$$

Таким образом, исследования значений $pH_{ИЭТ}$ показали, что за 4 часа поверхность наночастиц диоксида кремния предельно «аминирована», а дальнейшие процессы сорбции модификатора предположительно привели к образованию полимолекулярных структур с присутствием на поверхности анионных групп $-SiO^-$. Из рис. 8 видно, что начиная со времени синтеза 21 час значение $pH_{ИЭТ}$ оставалось практически

неизменным, что может свидетельствовать о достижении системой равновесного состояния.

Полученные образцы частиц были также качественно и количественно оценены с помощью метода окситермографии. На рис. 6 представлен профиль нагрева, при котором анализировались высушенные частицы. Были получены окситермограммы немодифицированных и аминированных частиц диоксида кремния. Методом окситермографии анализировались частицы с одинаковой массой (~10 мг). Окситермограммы немодифицированных и аминированных частиц кремнезема представлены на рис. 9–10.

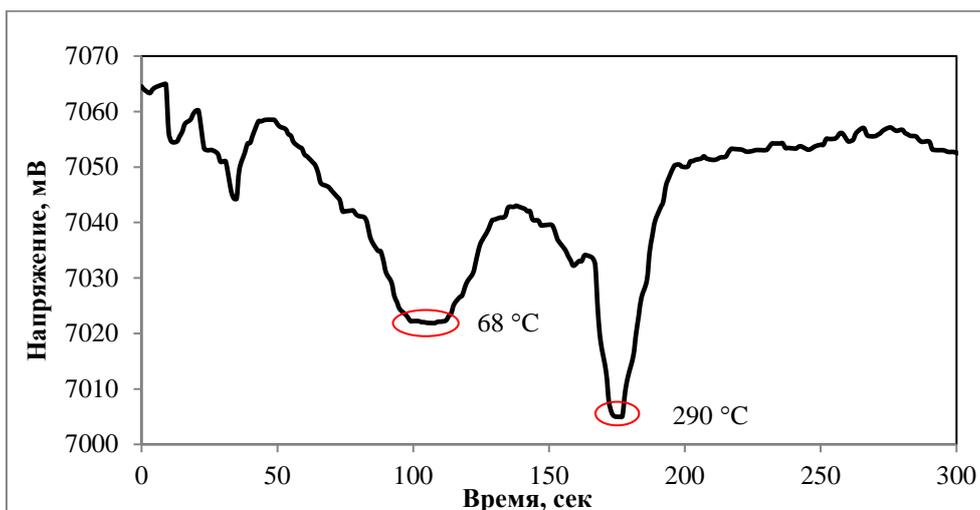


Рис. 9. Окситермограмма немодифицированных частиц диоксида кремния

Наличие пика на окситермограмме (рис. 9) свидетельствовало о существовании примесей. Сопоставив температурный профиль нагрева (см. рис. 6) и окситермограмму немодифицированных частиц, определили температуры окисления примесей и предположили, какие вещества подверглись окислению. Первый пик наблюдался при температуре 68 °C, пред-

положительно, это физически сорбированная вода на поверхности кремнезема. Второй пик появлялся при температуре 290 °C. Предположительно, это кремнийорганические олигомеры на поверхности частиц кремнезема, которые получались в результате частичной поликонденсации тетраэтоксисилана в растворе при формировании частиц.

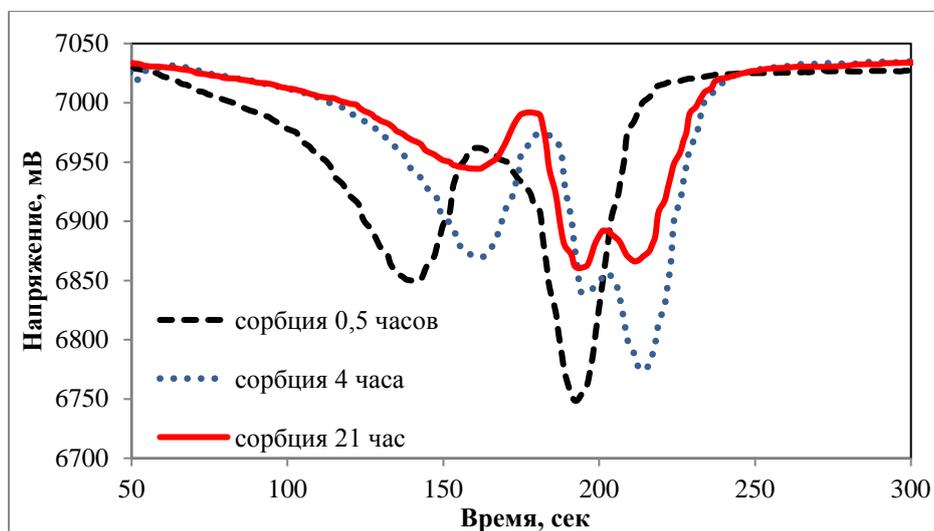


Рис. 10. Окситермограммы аминированных частиц со временем сорбции АПТЭС 0,5, 4 и 21 часов

На рис. 10 представлены окситермограммы аминированных частиц с различным временем сорбции АПТЭС. На окситермограмме наблюдались качественные и количественные различия в пиках. При различной продолжительности процесса сорбции АПТЭС характер

пиков изменялся, а именно: при времени сорбции 4 часа и 21 час в интервале времени 180–250 секунд наблюдались раздвоения пиков. Изменение формы пиков можно связать с тем, что в привитых сорбционных слоях при определенных температурах преобладают процессы раз-

рыва соответствующих связей с высвобождением «фрагментов» поверхностного вещества. При времени сорбции 0,5 часов раздвоение пика в области 180–250 секунд не наблюдалось в силу того, что за короткий промежуток времени модификатор не до конца заполнял сорбционные слои кремнезема.

Таким образом, данные, полученные методом окситермографии, подтверждаются результатами измерений электроповерхностных свойств дисперсий модифицированных частиц кремнезема, поскольку площадь пика соответствует количеству привитого соединения.

На основании градуировочной зависимости, полученной анализом различных количеств АПТЭС, была проведена оценка количества модификатора на поверхности одной наночастицы SiO₂ в сравнении с теоретическим значением. Теоретическое количество оценивалось, исходя из диаметра частиц и количества силанольных групп на поверхности одной частицы [2]. Оценка экспериментальных данных свидетельствовала об отсутствии плотного мономолекулярного слоя модификатора, поскольку количество привитого АПТЭС на поверхности гораздо меньше его теоретического значения (экспериментальное количество привитого АПТЭС – $9,3 \cdot 10^{-18}$ моль < теоретическое количество привитого АПТЭС – $1,6 \cdot 10^{-16}$ моль).

Выводы

При выполнении представленной экспериментальной работы была проведена химическая модификация 3-аминопропилтриэтоксисилоном поверхности частиц диоксида кремния средним диаметром 170 нм.

Изменение направления сдвига $pH_{ИЭТ}$ в основную область для модифицированных частиц свидетельствовало о хемосорбции молекул АПТЭС, содержащих аминогруппы, способные протонироваться в кислых средах.

По результатам измерения электрокинетического ζ -потенциала дисперсии модифицированных частиц кремнезема значение максимального сдвига $\Delta pH_{ИЭТ}$ составило 4,54 при времени синтеза 4 часа. Данный факт свиде-

тельствовал о достижении предельного аминирования при поверхностной модификации АПТЭС.

Методом окситермографии была проведена количественная оценка хемосорбции модификатора на поверхности частиц SiO₂. Данные, полученные методом окситермографии, согласуются с результатами измерений электроповерхностных свойств анализируемых систем.

Оценка экспериментальных данных свидетельствовала об отсутствии плотного мономолекулярного слоя модификатора, поскольку количество привитого АПТЭС на поверхности гораздо меньше его теоретического значения (экспериментальное количество привитого АПТЭС – $9,3 \cdot 10^{-18}$ моль < теоретическое количество привитого АПТЭС – $1,6 \cdot 10^{-16}$ моль).

Библиографический список

1. Айлер Р. Химия кремнезема. М.: Мир, 1982. Ч. 2. 712 с.
2. Александрова Е.О., Зуев Б.К., Новичков Р.В., Оленин А.Ю. Изучение механизма сорбции модификатора перфтордецилтриэтоксисилана на поверхности частиц диоксида кремния методом окситермографии // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». 2016. № 2(34). С. 3–10.
3. Ефимова А.И. Наноструктуры и наноматериалы. Синтез, свойства и применение. Гочжун Цао Ин Ван. М.: Научный Мир. 2012. 520 с.
4. Зуев Б.К. Способ окситермографии. Патент РФ № 2411509 приор. 15.01.2010 (Б. И. 2011. № 4).
5. Лисичкин Г.В. Химия привитых поверхностных соединений. М.: Физико-математическая литература, 2003. 592 с.
6. Масалов В.М., Сухина Н.С., Емельченко Г.А. Наноструктура частиц диоксида кремния, полученных многоступенчатым методом Штобера – Финка – Бона // Химия, физика и технология поверхности. 2011. Т. 2, № 4. С. 373–384.
7. Zuev B.K., Kovalenko V.V., Kul'bachevskaya E.V., Olenin A.Yu., Yagov V.V. // Journal of Analytical Chemistry. 2001. Vol. 56, No. 5. P. 481.

УДК 538.945

И. Р. Рахмонов, Ю. М. Шукринов, К. М. Родин**Моделирование вольт-амперной характеристики кольцевой системы параллельных джозефсоновских переходов**

На основе метода компьютерного моделирования фазовой динамики кольцевой системы параллельных джозефсоновских переходов рассчитаны вольт-амперная характеристика и временные зависимости напряжения при различных значениях базового тока. Приведено подробное описание методики вычисления вольт-амперной характеристики рассматриваемой системы. Показано, что на вольт-амперной характеристике кольцевой системы имеется дополнительная ветвь, которая связана с резонансом пульсирующего флюксона и плазменной волны.

Ключевые слова: эффект Джозефсона, джозефсоновские переходы, флюксон, модель Френкеля – Конторовой, вольт-амперная характеристика, ступеньки нулевого поля.

Об авторах

Рахмонов Илхом Рауфович – старший научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований. *E-mail:* rahmonov@theor.jinr.ru. 141981 Московская область, г. Дубна ул. Университетская, 19.

Шукринов Юрий Маджнунович – ведущий научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований.

Родин Кирилл Максимович – студент 1-го курса магистратуры кафедры нанотехнологий и новых материалов государственного университета «Дубна».

Кольцевая система джозефсоновских переходов (ДП) является одним из интереснейших объектов сверхпроводниковой электроники [1; 3–7; 9–12]. В этой системе наблюдается два типа возбуждений, а именно, нелинейные возбуждения в виде кинк-солитона (флюксона) вдоль системы и плазменные колебания в ДП, которые являются линейными [7; 11]. Хранение и управление флюксонами в длинных ДП [1] лежит в основе создания новых типов элементов логики [4]. Недавно были предложены новые семейства малодиссипативных логик, основанные на флюксоне как носителе бита информации [3; 6; 9; 10; 12]. Одно из новых логических семейств [10] основывается на использовании движущего флюксона вдоль одномерного массива, в котором джозефсоновские переходы сильно связаны индуктивностью вдоль направления движения флюксона. В работе [5] авторы показали, что для данного типа массива в режиме сильной связи существует устойчивое распространение флюксона в широком диапазоне базового тока. В этой работе также экспериментально подтверждаются результаты моделирования сложной динамики 2π -кинков в

модели Френкеля – Конторовой [2; 7; 8; 10; 11; 13]. Отметим важное обстоятельство, которое заключается в том, что динамические состояния системы проявляются на ее вольт-амперной характеристике (ВАХ). В работах [7; 11] продемонстрировано, что резонансы вращения флюксона в кольцевой системе ДП с плазменными колебаниями проявляются в виде ветвей на вольт-амперной характеристике системы. При определенных значениях параметров модели на ВАХ кольцевой системы образуется дополнительная ветвь [11], возникновение которой нельзя рассматривать как результат резонанса флюксона и плазменной волны.

В настоящей работе представлены результаты исследования причины образования данной ветви. Нами приведено подробное описание методики вычисления ВАХ, основанное на численном моделировании фазовой динамики кольцевой системы параллельных ДП. Рассчитаны ВАХ и временные зависимости напряжения при различных значениях базового тока. Проведен подробный анализ структуры ВАХ кольцевой системы ДП.

Теоретическая модель

Рассмотрим кольцевую систему N параллельно соединенных джозефсоновских переходов, схематический вид которой показан на рис. 1.

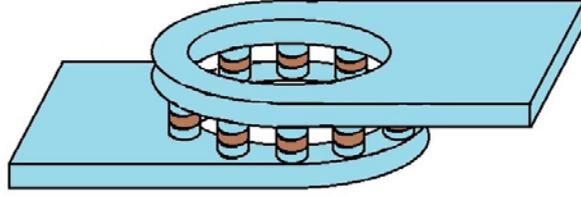


Рис. 1. Схематический вид кольцевой системы параллельных джозефсоновских переходов. Сверхпроводящие электроды обозначены светлым тоном, а возникающие ДП – более темным

Как было отмечено во введении, основной задачей настоящей работы является вычисление ВАХ данной системы, когда через нее пропускается ток I . Физические характеристики отдельного короткого джозефсоновского перехода описываются в рамках резистивной модели. Коротким считается такой ДП, геометрический размер которого мал по сравнению с джозефсоновской глубиной проникновения λ_J . Согласно резистивной модели Мак-Камбера – Стюарта [6; 12] отдельный джозефсоновский переход рассматривается как параллельно соединенные емкость, сопротивление и сверхпроводник. В этом случае полный ток через систему определяется как сумма токов: сверхпроводящего I_s , квазичастичного I_{qp} и тока смещения I_d

$$I = I_s + I_{qp} + I_d = I_c \sin \varphi + \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt}, \quad (1)$$

где C – емкость ДП; R – его сопротивление; φ и V – разность фаз и напряжение в джозефсоновском переходе соответственно.

Напряжение в ДП задается соотношением Джозефсона

$$V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt}. \quad (2)$$

С учетом (2) выражение для тока (1) принимает вид

$$\frac{\hbar C}{2e} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{\hbar}{2eR} \frac{d\varphi}{dt} + I_c \sin \varphi = I. \quad (3)$$

В случае длинного джозефсоновского перехода, когда геометрические размеры ДП больше чем λ_J , необходимо учитывать также поверхностный ток вдоль сверхпроводящего слоя, который определяется производной второго порядка от разности фаз

$$I_{surf} = \frac{S}{\mu_0 D} \frac{\hbar}{2e} \frac{d^2\varphi}{dx^2} = I_c \lambda_J^2 \frac{d^2\varphi}{dx^2}, \quad (4)$$

где $\lambda_J = \sqrt{\hbar S / (2e \mu_0 D I_c)}$ – джозефсоновская глубина проникновения; $D = 2\lambda_L + d$ – эффективная магнитная толщина; λ_L – лондоновская глубина проникновения; d – толщина диэлектрического

слоя; S – площадь сверхпроводящего слоя; μ_0 – магнитная постоянная. С учетом (4) выражение для полного тока через длинный ДП записывается в следующем виде

$$\frac{\hbar C}{2e} \frac{d^2\varphi}{dt^2} - \frac{S}{\mu_0 D} \frac{\hbar}{2e} \frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{\hbar}{2eR} \frac{d\varphi}{dt} + I_c \sin \varphi = I. \quad (5)$$

Нормируя время на обратную плазменную частоту $\omega_p = \sqrt{2eI_c / \hbar C}$, координату на λ_J и базовый ток I на критический ток ДП I_c , можно переписать уравнение (5) в безразмерной форме

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} - \frac{d^2\varphi}{dx^2} + \alpha \frac{d\varphi}{dt} + \sin \varphi = I, \quad (6)$$

где $\alpha = \sqrt{\hbar / 2eI_c R^2 C}$ – параметр диссипации.

Таким образом, фазовая динамика длинного ДП описывается возмущенным уравнением синус-Городона (СГ). Модель, основанная на уравнении СГ, представляет собой одну из наиболее фундаментальных нелинейных моделей, которая позволяет описывать различные возбуждения в системе, в частности кинки (флюксоны) и бризеры (динамические солитоны) и их взаимодействие. Отметим, что кольцевую систему параллельных ДП можно рассматривать в качестве дискретизированного длинного ДП. При переходе от непрерывного уравнения СГ к дискретному мы получим модельное уравнение Френкеля – Конторовой (ФК), которое описывает кольцевую систему параллельных ДП [7]:

$$\frac{\varphi_{n-1} - 2\varphi_n + \varphi_{n+1}}{a^2} - \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial t^2} = \sin \varphi_n + \alpha \frac{d\varphi_n}{dt} - I, \quad (7)$$

где φ_n – разность фаз на n -м ДП; $a = \sqrt{2eL_0I_c / \hbar}$ – расстояние между ДП в системе (параметр дискретности), нормированное на λ_J ; L_0 – геометрическая индуктивность одной ячейки. Здесь n изменяется в интервале $1 \leq n \leq N$, где N – количество ДП в системе. Связь между ближайшими переходами характеризуется константой связи $1/a^2$. Чем больше шаг решетки, т.е. дискретный параметр a , тем слабее связь между отдельными переходами.

Методика расчета ВАХ

Для вычисления ВАХ необходимо решить численно дифференциальное уравнение (7). Перепишем это уравнение в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dV_n}{dt} = \frac{\varphi_{n+1} - 2\varphi_n + \varphi_{n-1}}{a^2} - \sin \varphi_n - \alpha \frac{d\varphi_n}{dt} + I \\ \frac{d\varphi_n}{dt} = V_n \end{cases} \quad (8)$$

Для решения системы уравнений (8) используется метод Рунге – Кутты четвертого порядка [14]. Этот метод хорошо себя зарекомендовал при исследовании длинных джозефсоновских переходов.

Алгоритм расчета ВАХ состоит из нескольких этапов. Вначале задаются значение базового тока $I = I_0$ и начальные условия $\varphi_n(t)|_{t=0} = 0$ и $V_n(t)|_{t=0} = 0$. Затем, при заданном фиксированном значении тока, система уравнений (8) решается численно методом Рунге – Кутты четвертого порядка в интервале времени $[0, T_{\max}]$ с шагом Δt , и, как результат, определяется разность фаз $\varphi_n(t)$ и $V_n(t)$ как функции времени. Далее, необходимо вычислить среднее значение напряжения для заданного тока. Среднее значение напряжения вычисляется с использованием выражения

$$\langle V_n \rangle = \frac{1}{T_{\max} - T_i} \int_{T_i}^{T_{\max}} V_n(t) dt \quad (9)$$

Здесь вычисление интеграла напряжения проводится с использованием метода прямоугольников. Усредненное значение напряжения вычисляется по формуле $\langle V \rangle = \sum_{n=1}^N \langle V_n \rangle / N$.

Таким образом, мы находим соответствующее значение напряжения для заданного значения тока. Далее ток увеличивается на ΔI , и вышеописанная процедура вычисления повторяется. Отметим, что полученные при I значения $\varphi_n(T_{\max})$ и $V_n(T_{\max})$ используются в качестве начальных условий при $I + \Delta I$. Для уравнения (8) задаются периодические граничные условия. В этом случае пространственные точки $n = 0$ и $n = N + 1$ считаются эквивалентными $n = N$ и $n = 1$ соответственно. Следовательно, $\varphi_0 = \varphi_N - 2\pi M$ и $\varphi_{N+1} = \varphi_1 - 2\pi M$, где M – количество флюксонов, введенное в систему. При проведении расчетов нами рассматривается

простейший случай с одним введенным флюксоном, т.е. $M = 1$.

Основные результаты

Обсудим вначале особенности вольт-амперной характеристики кольцевой системы ДП. На рис. 2 представлена однопетлевая ВАХ, рассчитанная для кольцевой системы с $N = 10$ ДП при значениях параметров модели $\alpha = 0.1$, $a = 1$ и $M = 1$. При расчете ВАХ ток увеличивался от нуля до $I = 0.55$ и затем обратно, уменьшался до нуля.

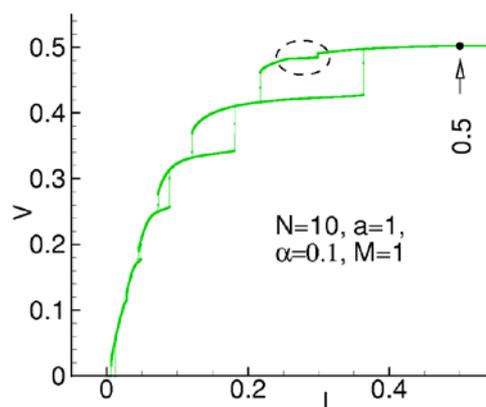


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика кольцевой системы $N = 10$ параллельных джозефсоновских переходов с параметром диссипации $\alpha = 0.1$, параметром дискретности $a = 1$ и с одним ($M = 1$) введенным флюксоном. Пунктирным эллипсом отмечена область ВАХ, где наблюдается дополнительная ветвь. Стрелка указывает значения базового тока, для которого рассчитана временная зависимость напряжения (см. рис. 3)

Как мы видим на рис. 2, ВАХ демонстрирует ветвистую структуру. При прохождении джозефсоновского перехода флюксон оставляет после себя плазменные колебания в виде «хвоста». Согласно работам [7; 11], ветвистая структура возникает вследствие резонанса между бегущим флюксоном и плазменными колебаниями на его «хвосте». Флюксон делает полный оборот по кольцу и догоняет свой «хвост», попадая в резонанс с определенным плазменным колебанием. Частоты плазменных колебаний определяются законом дисперсии плазменной волны в рассматриваемой системе:

$$\omega_m = \sqrt{1 + \frac{4}{a^2} \sin^2 \left(\frac{\pi m a}{L} \right)}, \quad (10)$$

где $L = Na$ – длина кольцевой системы ДП; m – целое число, которое указывает количество

длин волн, укладывающихся на длине кольцевой системы. Закон дисперсии (10) можно получить, линеаризовав уравнение (7) и пренебрегая затуханием ($\alpha = 0$) и внешним током ($I = 0$) [11]. В соответствии с выражением (10) резонанс с номером m возникает, когда прохождение флюксона через заданную точку массива совпадает с m -м максимумом колебаний, вызванных плазменной волной, распространяющейся за флюксонном.

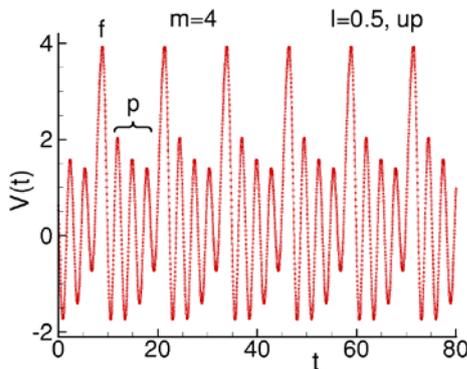


Рис. 3. Временная зависимость напряжения при $I = 0.5$ в случае нарастания тока. Буквой f указан максимум, соответствующий прохождению флюксона через данный ДП, а буквой p указаны плазменные колебания

В этом можно убедиться, проанализировав временную зависимость напряжения для определенного значения тока, соответствующего резонансной ветви. На рис. 3 представлена временная зависимость напряжения для значения тока $I = 0.5$, соответствующего верхней ветви на ВАХ (это значение тока отмечено точкой на рис. 2). Напряжение демонстрирует осцилляции с периодически меняющейся амплитудой. Максимумы напряжения, отмеченные буквой f , соответствуют тому, что в данный момент времени через ДП проходит флюксон, а максимумы, отмеченные буквой p , соответствуют плазменным колебаниям. То есть флюксон достигает свой хвост через время, соответствующее четырем плазменным колебаниям, что приводит к реализации резонанса с $m = 4$. На ВАХ наблюдается дополнительная ветвь, отмеченная пунктирным эллипсом на рис. 2. В работах [7; 11] эта ветвь также проявлялась, но ее происхождение в этих работах не исследовалось. Увеличенная часть ВАХ в этой области представлена на рис. 4.

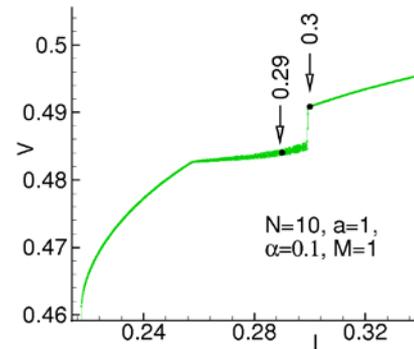


Рис. 4. Увеличенная часть ВАХ в области дополнительной ветви

Причина возникновения этой дополнительной ветви не может быть объяснена на основе выражения (10). Для её выяснения нами был проведен сравнительный анализ временных зависимостей напряжения в области дополнительной ветви и в ее окрестностях, что позволяло объяснить возникновение этой ветви. На рис. 5а представлена временная зависимость напряжения до перехода на дополнительную ветвь при значении тока $I = 0.3$. Как и следовало ожидать, на этой зависимости наблюдаются максимумы с фиксированным периодом, что демонстрирует резонанс с числом $m = 4$. Другая картина наблюдается в области дополнительной ветви ВАХ, для которой временная зависимость напряжения, рассчитанная при $I = 0.29$, показана на рис. 5б. Здесь также наблюдаются максимумы с фиксированным периодом. Но отличие в том, что амплитуда меняется с периодом движения флюксона, т.е. наблюдается модуляция каждого второго максимума. Таким образом, в этой области кинк-флюксон демонстрирует пульсирующее поведение.

Пульсация флюксона хорошо просматривается на рис. 6, где представлена временная эволюция пространственного распределения магнитного поля в джозефсоновских переходах, соответствующая точке ВАХ при $I = 0.29$, т.е. в области дополнительной ветви ВАХ. Как видно, перемещаясь по ДП системы, флюксон демонстрирует пульсацию. Стрелки указывают номера ДП, в которых происходит пульсация. Проведенный анализ показывает, что резонанс данной пульсации с плазменными колебаниями является причиной возникновения дополнительной ветви на ВАХ.

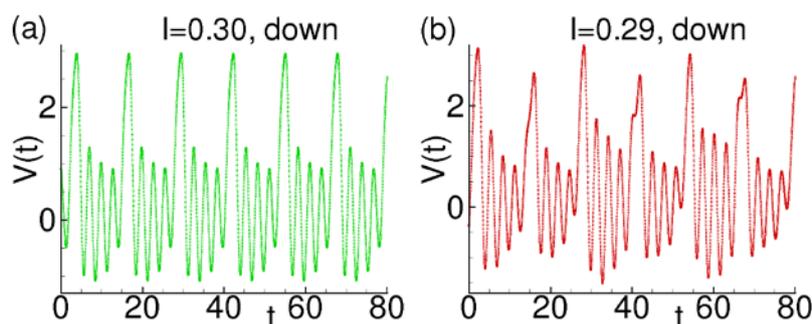


Рис. 5. Временная зависимость напряжения в режиме уменьшения внешнего тока: при (a) $I = 0.3$; (b) $I = 0.29$

$N=10, I=0.29, a=1$

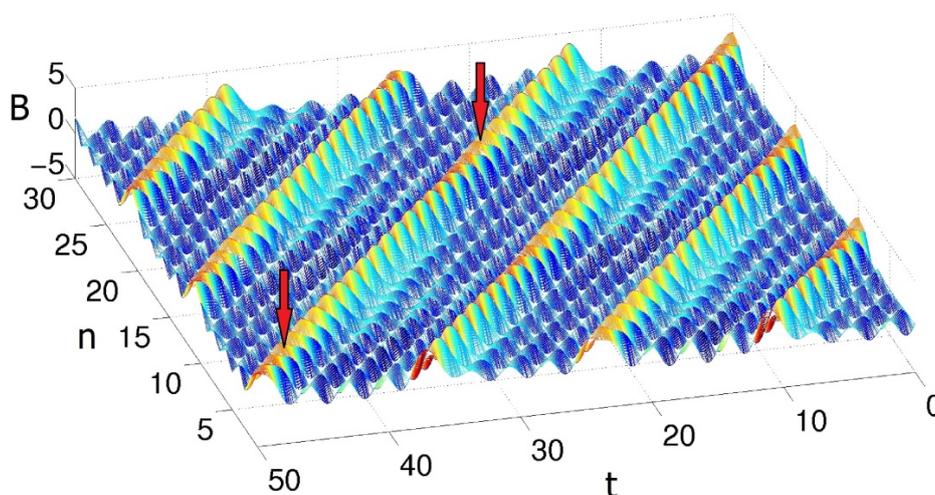


Рис. 6. Временная эволюция пространственного распределения магнитного поля в джозефсоновских переходах, соответствующая точке ВАХ при $I = 0.29$. Стрелки указывают момент времени и номер ДП, где наблюдается пульсация флюксона

Заключение

В заключение отметим, что в настоящей работе рассчитана ВАХ кольцевой системы ДП и временная зависимость напряжения в отдельных ДП системы. Сравнительный анализ временных зависимостей в области дополнительной ветви и вне ее свидетельствует о пульсации кинк-флюксона в этой области. Показано, что именно резонанс пульсаций флюксона и плазменных колебаний приводит к появлению дополнительной ветви на ВАХ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проектов 18-02-00318, 18-32-00950 и 15-29-01217 и Объединенным институтом ядерных исследований в рамках проекта 18-302-08.

Библиографический список

1. Cirillo M., Appl J. Inductively coupled fluxon oscillators// Phys. 58. 1985. P. 3217–3230.
2. Cirillo M., Larsen B.H., Ustinov A.V., Merlo V., Oboznov V.A., Leoni R. On magnetic flux dynamics in 1D arrays of underdamped Josephson junctions// Phys. Lett. A 183. 1993. P. 383–389.
3. Herr Q.P., Herr A.Y., Oberg O.T., Ioannidis A.G. Ultra-low-power superconductor logic// J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 1–8.
4. Likharev K.K., Semenov V.K. RSFQ logic/memory family: a new Josephson-junction technology for sub-terahertz-clock-frequency digital systems// IEEE Trans. Appl. Supercond. 1991. V. 1. P. 3–28.
5. Lucci M., Badoni D., Merlo V., Ottaviani I., Salina G., Cirillo M., Ustinov A.V., Winkler D. Experimental Study of Spectral Properties of a Frenkel-

Kontorova System. // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 1–5.

6. Mukhanov O.A. Energy-efficient single flux quantum technology// IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21. P. 760–769.

7. Pfeiffer J., Abdumalikov A.A., Schuster Jr. M., Ustinov A.V. Resonances between fluxons and plasma waves in underdamped Josephson transmission lines of stripline geometry// Phys. Rev. B 77. 2008. P. 1–6.

8. Pfeiffer J., Schuster M., Abdumalikov A.A., Ustinov A.V. Observation of Soliton Fusion in a Josephson Array// Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 1–4.

9. Ren J., Semenov V.K. Progress with physically and logically reversible superconducting digital circuits// IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21. P. 780–786.

10. Semenov V.K., Danilov G.V., Averin D.V. Negative-inductance SQUID as the basic element of

reversible Josephson-junction circuits// IEEE Trans. Appl. Supercond. 2003. V. 13. P. 938–943.

11. Ustinov A.V., Cirillo M., Malomed B.A. Fluxon dynamics in one-dimensional Josephson-junction arrays// Phys. Rev. B 47. 1993. P. 8357–8360.

12. Volkman M.H., Sahu A., Fourie C.J., Mukhanov O.A. Implementation of energy efficient single flux quantum digital circuits with sub-aJ/bit operation// Supercond. Sci. Technol. 2013. V. 26. P. 28.

13. Zant H.S.J., Orlando T.P., Watanabe S., Strogatz S.H. Kink Propagation in a Highly Discrete System: Observation of Phase Locking to Linear Waves// Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. P. 174–177.

14. Рахмонов И.П., Шукринов Ю.М., Атанасова П.Х., Земляная Е.В., Башанин М.В. Влияние индуктивной и емкостной связи на вольт-амперную характеристику и электромагнитное излучение системы джозефсоновских переходов// ЖЭТФ. 2017. № 151. С. 151–159.

Поступила в редакцию
26.05.2018

УДК 504.75.05

А. Б. Спиридонова, О. А. Савватеева**ВУРС: динамика и прогноз**

Представлен анализ экологических последствий аварии, произошедшей 29 сентября 1957 г. на ПО «Маяк» из-за выхода из строя системы охлаждения, где в течение 10–11 часов радиоактивные вещества выпали на протяжении 300–350 км в северо-восточном направлении от места взрыва, образовав Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). К настоящему времени концентрация радионуклидов в различных экосистемах снизилась в сотни-тысячи раз, причем наиболее быстро этот процесс шел в первые пять лет. В настоящее время радиоактивное загрязнение территории в районе предприятия определяется в основном ^{90}Sr , ^{137}Cs и, в значительно меньшей степени, плутонием, что обуславливает долговременный характер его воздействия. До сих пор сохраняется необходимость оценки степени опасности хозяйствования на значительных по площади загрязнённых территориях.

В работе приведены современные данные о происходящих процессах на территории ВУРСа. Рассмотрены научные основы оценки воздействия поллютантов на биоту, а также изучена динамика радиоактивной обстановки и прогноз до 2047 г.

Ключевые слова: ВУРС, динамика, прогноз, стронций, цезий, радиация, авария, техногенная авария, радиоактивное загрязнение.

Об авторах

Спиридонова Анастасия Борисовна – студент-магистр кафедры экологии и наук о Земле государственного университета «Дубна». E-mail: naspiri@yandex.ru. Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская 19/3, кв. 305а.

Савватеева Ольга Александровна – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и наук о Земле государственного университета «Дубна».

29 сентября 1957 г. в 16:22 на ПО «Маяк», расположенном в городе Озёрске Челябинской области, из-за выхода из строя системы охлаждения произошёл взрыв ёмкости объёмом 300 м³, где содержалось около 80 м³ высокорadioактивных ядерных отходов. Мощность взрыва оценена в 70–100 т. в тротиловом эквиваленте, ёмкость была разрушена, бетонное перекрытие толщиной 1 м и весом 160 т отброшено в сторону. В атмосферу было выброшено около 20 МКи ($7,4 \cdot 10^{17}$ Бк) радиоактивных веществ ($^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$, $^{95}\text{Nb} + ^{95}\text{Zr}$, ^{90}Sr , ^{137}Cs , изотопы плутония и др.), из которых примерно 18 МКи выпало на территории ПО «Маяк», а около 2 МКи – за её пределами, образовав Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). Непосредственно от взрыва никто не погиб.

Наземные и водные экосистемы территории ВУРСа (озёра Урускуль, Бердениш, Кожаккуль, река Караболка, болото Бугай и др.) были загрязнены радиоактивными веществами. В головной части следа наблюдалась массовая гибель отдельных звеньев экосистем (сосна,

ряд видов травянистых растений, почвенная фауна и др.). Суммарная бета-активность воды достигала в начальный период 1000–10 000 Бк/л; уровни загрязнения почвы в головной части ВУРСа достигали 2000 Ки/км² и выше. Основную роль в долговременном загрязнении наземных и водных систем играет ^{90}Sr .

Современная радиационная обстановка в районе предприятия «Маяк» сформировалась в 1950–1960 гг. в результате следующих радиационных аварий и инцидентов:

– регламентных и аварийных сбросов ЖРО радиохимического производства в р. Теча в период с 1949 по 1956 гг. Пойма и донные отложения р. Теча до настоящего времени загрязнены радионуклидами (в основном ^{90}Sr и ^{137}Cs), а иловые отложения в верхней части реки классифицируются как ТРО;

– регламентных и аварийных газоаэрозольных выбросов осколочных радионуклидов из высоких труб реакторного и радиохимического производства в период с 1950 по 1960 гг., когда отсутствовали эффективные методы газоочистки;

– взрыва ёмкости с жидкими высокоактивными отходами радиохимического произ-

водства в 1957 г. с выбросом в атмосферу $7,4 \cdot 10^{17}$ Бк (20 МКи) бета-излучающих радионуклидов;

– ветрового выноса в 1967 г. донных отложений с обнажившихся берегов водоема В-9 (оз. Карачай), использовавшегося в качестве

хранилища жидких среднеактивных отходов радиохимического производства.

Сильно загрязненными оказались территории Челябинской, Свердловской и Тюменской областей общей площадью более 23 тыс. км² (рис. 1) [14].

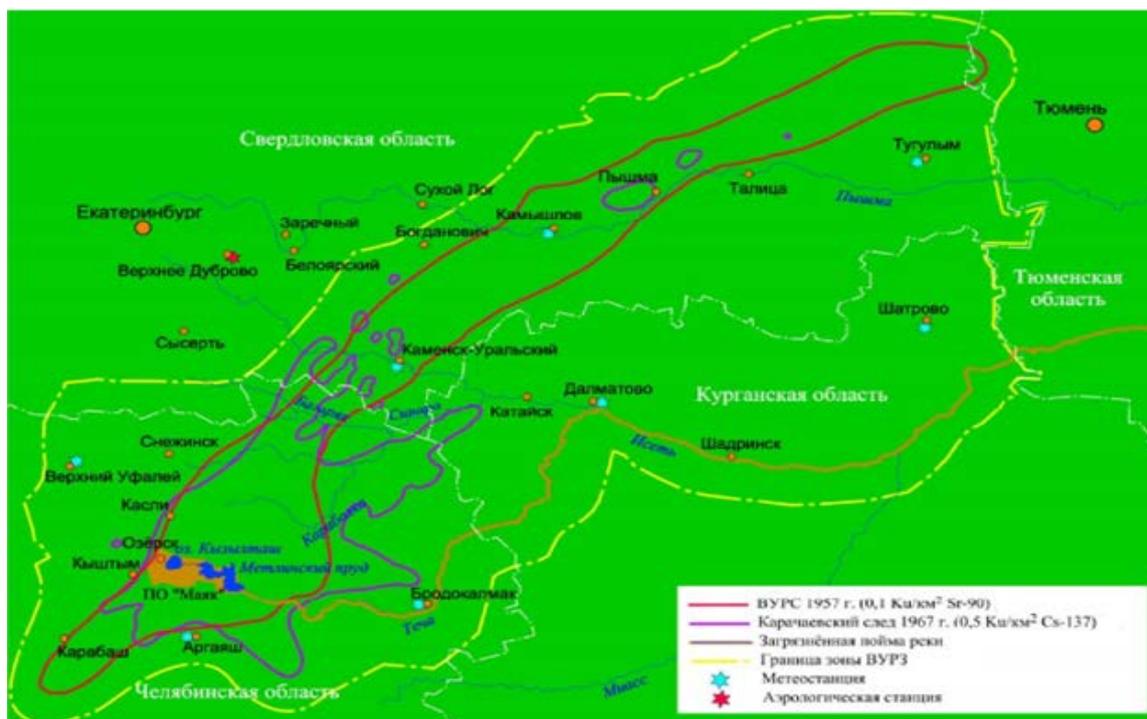


Рис. 1. Зона Восточно-Уральского радиоактивного загрязнения

Формирование ВУРС в основном закончено после осаждения радионуклидов из проходящего радиоактивного облака. В пределах плотности загрязнения местности по ^{90}Sr свыше $3,7 \text{ кБк м}^{-2}$ это произошло через 11 ч на расстоянии 300 км от места взрыва. Все это время ветер сохранял направление на северо-северо-восток, а потому след оказался сильно вытянутым. Поскольку при его образовании атмосферные осадки не выпадали, а до того, как установился постоянный снежный покров, случались периоды сухой погоды с сильными ветрами, то в течение первых 1–1,5 месяцев в периоды сухой погоды и сильных ветров наблюдалось перераспределение радионуклидов на местности под действием ветрового подъема. Это привело к дополнительному загрязнению участков, прилегающих к головной части следа, где заражение

было максимальным. Поэтому след здесь шире и размыт в восточном направлении. Пространственное распределение радиоактивных загрязнений характеризуется явно выраженной осью следа, сравнительно монотонным убыванием загрязнения вдоль этой оси и быстрым спадом плотности загрязнения местности в поперечных к оси следа направлениях.

В качестве «реперного» радионуклида, по содержанию которого оценивали радиоактивное загрязнение, был принят ^{90}Sr : с одной стороны, его период полураспада достаточно велик, с другой – он содержался в заметном количестве и играл наиболее важную роль в формировании доз долговременного облучения живых организмов. Поэтому в дальнейшем плотность загрязнения указана именно по ^{90}Sr (рис. 2).

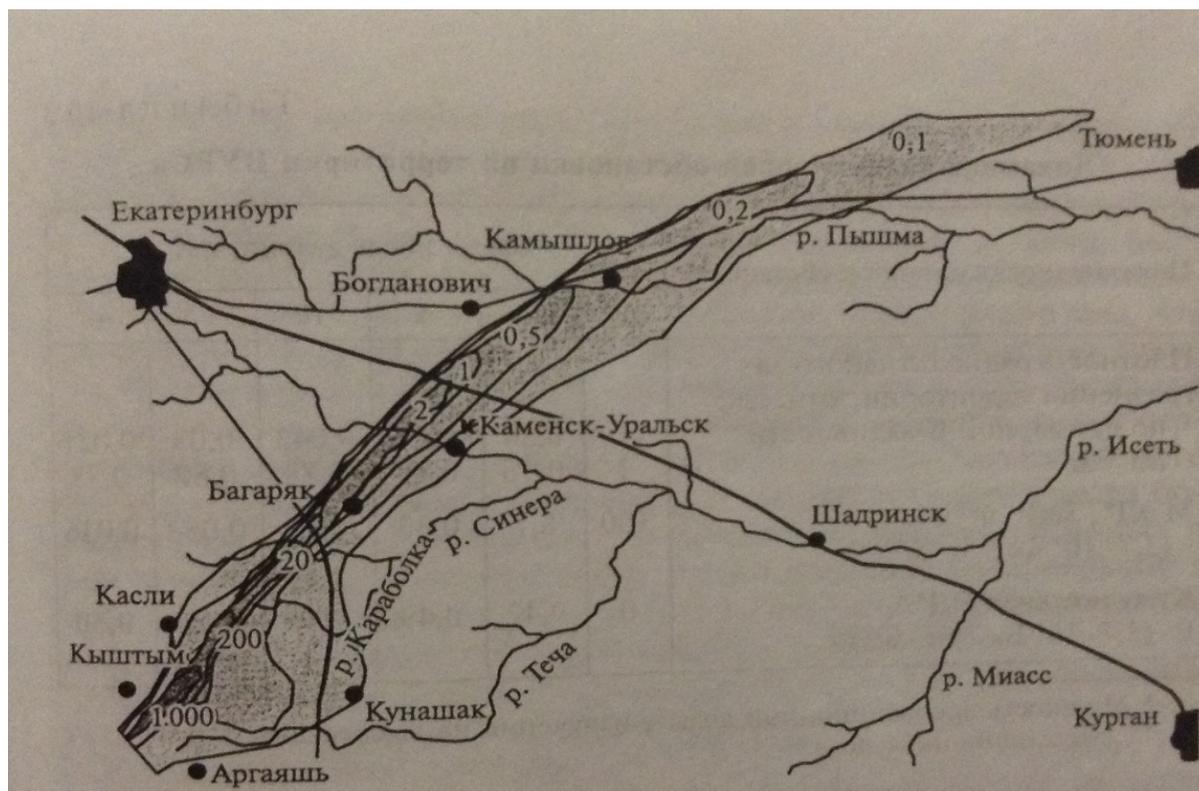


Рис. 2. Карта ВУРС. Цифрами обозначены изолинии плотностей загрязнения территории стронцием-90 в единицах $3,7 \cdot 10^4 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2}$

Территория лесного и лесостепного Зауралья с большим разнообразием природных условий площадью 23 тыс. км, на которой в 1957 г. проживало 273 тыс. чел., оказалась загрязненной с плотностью загрязнения более $3,7 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$. На большей ее части отсутствуют резко выраженные формы рельефа. Однако ландшафтная неоднородность – наличие большого количества болот, озер, различного рода понижений и впадин, лесных массивов – усложняет структуру земной поверхности и, соответственно, оказывало значительное влияние на неравномерность радиоактивных выпадений. На территории, загрязненной свыше $74 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$, оказалось 10 тыс. чел. и свыше $3700 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$ – 2100 чел.

В зоне ВУРСа прекратили существование 12 колхозов, из пользования которых было выведено более 28 тыс. га сельскохозяйственных угодий, в том числе: пашни – около 19 тыс. га, пастбищ – почти 3 тыс. га, сенокосов – более 5 тыс. га.

Из внутренней части следа длиной примерно 105 км при ширине около 8–9 км, имеющей площадь около 600 км^2 и загрязненной

свыше $74 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$, было эвакуировано население. Из наиболее загрязненных территорий это было сделано в пределах 10 дней, а из других мест – в течение 18 месяцев. В наиболее загрязненной головной части ВУРСа 29 апреля 1966 г. по решению Совета Министров РСФСР был создан Восточно-Уральский государственный заповедник. Общая площадь его составила 166 км^2 [1].

В ноябре – декабре 1957 г. силами ЦЗЛ ПО «Маяк» и Института прикладной геофизики Госкомгидромета СССР было проведено уточнение реальных масштабов радиационного загрязнения на территории от предприятия до г. Каменск-Уральского Свердловской области (105 км).

В 1960 г. Институт прикладной геофизики продолжил работы, направленные на изучение пространственного распределения радионуклидов на различных участках местности. Позднее (в 1964, 1974, 1980 гг.) изучение динамики радиационной обстановки проводилось силами специально созданной в 1958 г. Опытной научно-исследовательской станции (ОНИС) ПО «Маяк». В процессе исследований использова-

лись гамма-спектрометрические, радиометрические и радиохимические методы анализа содержания радионуклидов в объектах окружающей среды и биосубстратах [9].

В табл. 1 представлена общая динамика радиационной обстановки на территории ВУРС. Загрязненность территории по смеси радионуклидов за 40 лет снизилась в результате распада почти в 50 раз. Мощность поглощен-

ной дозы внешнего β -излучения превышала на момент аварии мощность дозы γ -излучения в 4–100 раз, а сформировавшиеся за первый год после аварии дозы β -излучения превышали экспозиционную дозу γ -излучения в 10–50 раз. Поэтому облучение биогеоценозов в первые годы после аварии было в основном обусловлено внешним β -излучением.

Таблица 1. Динамика радиоактивной обстановки на территории ВУРСа

Показатель радиационной обстановки	Время после аварии, лет							
	0	1	5	10	25	40	75 (прогноз)	
Плотность радиоактивного загрязнения территории, отн. ед.: по суммарной β -активности по ^{90}Sr	1	0,34	0,057	0,043	0,03	0,021	0,88	
	1	0,96	0,89	0,78	0,52	0,38	0,16	
Мощность эквивалентной дозы γ -излучения на высоте 1 м	150	8,7	0,33	0,15	0,053	0,036	0,017	
Кумулятивная экспозиционная доза	0	0,42	0,49	0,49	0,50	0,50	0,5	
Концентрация радионуклидов, %:	трава	100	10	1	0,4	0,05	0,025	0,01
	зерно	100	20	1	0,8	0,3	0,2	0,1
	молоко	100	10	1	0,4	0,06	0,08	0,1
	вода озер	100	3	1	0,75	0,1	0,08	0,05

В последующем радиационная обстановка на территории ВУРСа значительно изменилась к лучшему – опасность облучения человека и природных объектов снизилась в основном под действием четырех факторов:

– радиоактивного распада короткоживущих радионуклидов;

– перераспределения радиоактивных веществ, в том числе за счет заглубления в почве и донных отложениях;

– изменение механизмов поступления радионуклидов в растительность (прекратилось непосредственное поверхностное загрязнение растений, снизилось загрязнение, обусловленное ветровым переносом);

– хозяйственной деятельности, в частности мероприятий по радиационной защите населения.

Концентрация радионуклидов в различных экосистемах снизилась к настоящему времени в сотни-тысячи раз, причем наиболее быстро этот процесс шел в первые пять лет. В настоящее время радиоактивное загрязнение территории в районе предприятия определяется в основном ^{90}Sr , ^{137}Cs и, в значительно меньшей степени, плутонием, что обуславливает долго-

временный характер радиационного воздействия [4].

По состоянию на 31.12.2016 г. общая площадь территории, загрязненной радионуклидами, составляет 446,8 км², включая 212,3 км² земли санитарно-защитной зоны (промышленной площадки) и 196 км² земли зоны наблюдения.

В течение 2016 г. в зоне влияния ФГУП «ПО «Маяк» не выявлено неучтенных или вновь загрязненных территорий. Проводилась реабилитация ранее загрязненных территорий на заводских площадках. Проведены работы в рамках КИРО на загрязненных участках площадки радиохимического завода.

Анализ данных системы радиационного мониторинга Росгидромета последних лет показывает, что в районе ФГУП «ПО «Маяк» радиационная обстановка остается стабильной, а радиоактивное загрязнение окружающей среды сохраняется на среднемноголетнем уровне. Накопление на почве радионуклидов, выпавших из атмосферы, за период наблюдений последних лет незначительно по сравнению с их суммарным запасом в почве и практически не сказывается на уровнях загрязнения, сложив-

шихся ранее. Уровни радиационного фона на местности, кроме наиболее загрязненных районов (отдельные участки СЗЗ, ВУРСа, поймы р. Теча), практически везде соответствуют естественному фону.

В целом радиационная обстановка в зоне влияния ПО «Маяк» стабильна. Превышения контрольных уровней по всем контролируемым территориям не отмечено. Анализ результатов мониторинга последних лет свидетельствует о стабильной радиационной и радиоэкологической обстановке в зоне влияния ФГУП «ПО «Маяк» [5].

В 2016 г. выполнена апробация системы экологического мониторинга состояния биоты специальных промышленных водоемов на примере изучения экосистемы водоема В-4. Изучены видовой состав и особенности развития фитопланктонных, зоопланктонных организмов и зообентоса в водоеме, вода которого относится к 4-му классу качества («загрязненные») экологической классификации. Оценено состояние водоема В-4 в соответствии с классификацией эффектов антропогенного воздействия на водные экосистемы, которое определено как антропогенное эвтрофирование.

Современное общебиологическое состояние р. Теча почти не отличается от сходных показателей видового разнообразия и продуктивности экосистем региона, типичных для малых рек. С другой стороны, создание санитарной зоны привело к увеличению численности и росту биологической продуктивности популяций отдельных видов животных (рыбы, водоплавающей и околоводной птицы, некоторых видов млекопитающих, в частности, ондатры и бобров) [12].

Возможность долговременного, на протяжении жизни одного поколения после аварии (70 лет), проживания населения на загрязненной территории определяется условием, чтобы потенциальная доза облучения населения за этот период не превышала предельной, специально устанавливаемой дозы облучения за этот же самый период. До недавнего времени в отечественной и зарубежной практике радиационной защиты не было опыта установления предела дозы облучения населения за такой длительный период (хотя и известны различные по численным значениям предельные дозы за аварию, длительность которой подразумевается небольшой). Первая серьезная попытка в этом направлении была предпринята Национальной

комиссией по радиационной защите (НКРЗ) и Министерством здравоохранения СССР в применении к населению, облучаемому в результате аварии на Чернобыльской АЭС. В качестве предела эквивалентной дозы суммы внешнего и внутреннего облучения населения принято значение, равное 35 бэр за жизнь.

Когда предел дозы за жизнь установлен, можно оценить максимально допустимую плотность загрязнения территории одним или несколькими долгоживущими радионуклидами, при которой возможно длительное проживание населения. С этой целью следует оценить динамику и интегральную за 70 лет дозу по всем путям внешнего и внутреннего облучения населения в расчете на единичную плотность загрязнения, применяя основные количественные показатели формирования внешнего и внутреннего облучения, определяемые с учетом радиоэкологических особенностей. В этой связи существенное значение приобретает прогноз снижения мощности дозы внешнего облучения из-за заглубления радиоактивного вещества в почву и предпринимаемых мер дезактивации, а также прогноз снижения мощности дозы внутреннего облучения в результате мер радиационной защиты, а также природных радиоэкологических факторов. Сопоставляя обоснованные для предельной дозы 35 бэр плотности загрязнения и реальные начальные значения, можно принимать решения о возможности долговременного проживания населения на загрязненной территории.

До 1995 г. радиоактивное загрязнение не было отражено на единой системной картографической основе. Имелись лишь отдельные карты, составленные, как правило, для населенных пунктов на основе использования разных методик определения радионуклидов.

Несмотря на значительный объем проведенных работ, можно считать, что до 1996 г. на территории влияния ПО «Маяк» работы носили рекогносцировочный характер. Полученные результаты съёмки не могли удовлетворять требованиям расчёта дозовых нагрузок радиоактивного воздействия на население с момента аварий до настоящего времени. Особенностью сложившейся радиационной обстановки на загрязнённых территориях является долговременность воздействия на население нескольких радионуклидов (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu и др.).

Необходимость создания комплекса карт современных и ретроспективных уровней ра-

диоактивного загрязнения Уральского региона возникла в начале 90-х гг. XX в. в связи с «Государственной программой РФ по реабилитации загрязнённых территорий Уральского региона и мерах оказания помощи пострадавшему населению на 1992–1995 гг.».

В настоящее время существует атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включающий прогноз до 2047 г. (рис. 3, 4).

Восточно-Уральский и Карачаевский радиоактивные следы характеризуются устойчивой динамикой снижения загрязнения окружающей среды радионуклидами, в составе которых на ВУРСе преобладает ^{90}Sr , а на Карачаевском следе – биологически малодоступные соединения ^{137}Cs и ^{90}Sr .

В почвах ВУРСа скорость вертикальной миграции ^{90}Sr составляет 0,25–0,35 см/год, основное количество радионуклида остаётся в верхней части почвенного профиля (0–20 см), уменьшаясь по глубине. Малоподвижные цезий и плутоний сохраняются преимущественно в верхнем 10-сантиметровом слое. На заливаемой пойменной почве (на р. Теча) скорость вертикальной миграции радионуклидов выше, а ^{90}Sr и ^{137}Cs обнаруживаются на глубине более 70 см.

На ВУРСе через 60 лет после аварии в почве содержание фиксированных форм ^{90}Sr

достигает 34%, ^{137}Cs и плутония – 95–98%. Биологическая доступность ^{90}Sr за прошедший период уменьшилась в 7–10 раз и, следуя прогнозу, будет изменяться в меньшую сторону.

В проточном водоёме (р. Теча) в связи с прекращением интенсивного сброса радиоактивных отходов с 1965 по 2004 гг. произошло снижение концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде в 7 раз. В донных отложениях реки отмечается миграция радионуклидов на глубину более 35 см. Уровень загрязнения слоя 0–10 см зависит от концентрации радионуклидов в водном потоке. В донных отложениях скорость заглубления ^{90}Sr составляет около 0,5 см/год.

За 60 лет доля ^{90}Sr в донных отложениях увеличилась до 95–98%, а в воде соответственно снизилась до 2–5%. Содержание ^{90}Sr в биоте определяется его концентрацией в воде.

В современный период удельная активность ^{90}Sr в воде р. Теча составляет – 10–15 Бк/л, а ^{137}Cs – 0,5–1,5 Бк/л, что делает необходимо сохранять ограничительные мероприятия. Прогноз развития радиационной ситуации на р. Теча определяется дополнительным радиационным загрязнением, обусловленным поступлением радиоактивных веществ из Теченского каскада водоёмов.



Рис. 3. Прогноз загрязнения почв стронцием-90 на 2047 г.

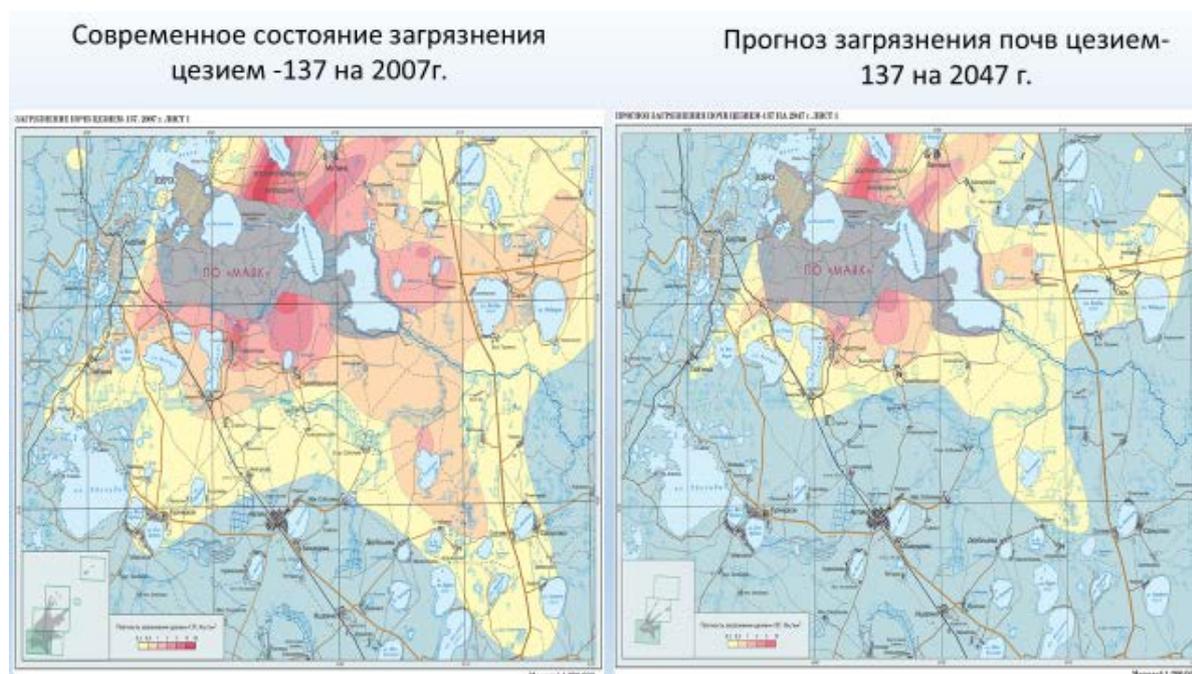


Рис. 4. Прогноз загрязнения почв цезием-137 на 2047 г.

В 2012 г. максимальные уровни загрязнения фиксировались исследователями по всей линии расположения Асановских болот и прослеживались до 100–120 м от берега. По данным «Атласа Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года» (Росгидромет и РАН, 2013 г.), здесь встречаются места, где высокие плотности загрязнения по ^{90}Sr достигают значений 100 Ки/км², а по ^{137}Cs – до 500 Ки/км². Наиболее часто в зоне закрытых растительностью болот проявляются плотности загрязнения по ^{90}Sr в 12–15 Ки/км². Уровни загрязнения по ^{137}Cs гораздо выше и в среднем составляют 130 Ки/км² [13].

В настоящее время выполняется комплекс мероприятий по мониторингу и поддержанию закрытых РАО в безопасном состоянии. В перспективе – проведение ликвидации акватории водоема В-17 (Старое Болото). Ориентировочный срок завершения консервации водоема В-17 – 2025 г. При консервации водоема В-17 планируется использовать технические решения, апробированные и примененные при закрытии акватории водоема В-9 (оз. Карачай) [5].

Подводя итоги 60 лет существования заповедника, можно сказать, что наравне с задачами изоляции и мониторинга очага радиоактивного загрязнения он успешно справляется с природоохранной задачей, которая заключается в сохранении природных комплексов лесостеп-

ного Зауралья, прежде всего лесных массивов, поддержании биологического разнообразия, играет заметную средообразующую роль в регионе. Однако деятельность Восточно-Уральского заповедника на современном этапе связана с серьезными проблемами. При его создании не были продуманы полностью организационные и юридические вопросы. На всем протяжении своего существования заповедник не имел юридической самостоятельности [11].

По прогнозам, загрязнение территории ^{137}Cs и ^{90}Sr будет снижаться и достигнет приемлемых концентраций уже через 15 лет, но ожидается дополнительное радиационное загрязнение на р. Теча, обусловленное поступлением радиоактивных веществ из Теченского каскада водоёмов, что подразумевает сохранение санитарно-охранного режима р. Теча и её поймы.

Особую значимость приобретает необходимость научного обеспечения принятия решений о проведении всего комплекса мероприятий, информационно-разъяснительная работа среди населения и участников ликвидации последствий радиационных аварий, необходимость совершенствования действующей законодательной и нормативной базы в области радиационной безопасности.

Библиографический список

1. Белозерский Г.Н. Радиационная экология. М.: Академия, 2008. 384 с.

2. Владимирова В.А. Катастрофы конца 20 века. М.: Геополитика, 2001. 424 с.

3. Владимиров В. А., Измалков В. И. Катастрофы и экология. М.: Контакт-культура, 2006. 379 с.

4. Романов Г.Н., Воронов А.С. Радиационная обстановка после аварии. М.: ИздАТ, 2000. 336 с.

5. Мокров Ю.Г., Иванов И.А., Бакуров А.С., Коновалов А.В., Антонова Т.А. Радиационная обстановка в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения ФГУП «ПО «Маяк» в 2016 году: отчет. Озерск: ФГУП «ПО «Маяк», 2017. – 73 с.

6. Тетерин А.Ф., Маркелов Ю.И., Александров И.П. Потенциал загрязнения атмосферы в зоне Восточно-Уральского радиоактивного загрязнения. Е.: Вестник НВГУ, 2016.

7. Ярошинская А.А. Ядерная энциклопедия. М.: Благотворительный фонд Ярошинской, 1996. 656 с.

8. Атлас ВУРСа 2013. URL: http://downloads.igce.ru/publications/Atlas/CD_VURS/7-12.html#page11b (режим доступа: свободный. Дата обращения 13.08.2017).

9. Восточно-Уральский заповедник | Красная Книга Челябинской области. URL: <http://redbook.ru/>

[article837.html](#) (режим доступа: свободный. Дата обращения 04.09.17).

10. Концепция федеральной целевой программы «Преодоление последствий радиационных аварий на период до 2015 года» I. Предварительный анализ итогов реализации. URL: <https://refdb.ru/look/1503333.html> (режим доступа: свободный. Дата обращения 26.08.2017).

11. Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона. URL: http://chernobyl-mchs.ru/upload/program_rus/program_rus_1993-2010/Posledstviy_Ural.pdf (режим доступа: свободный. Дата обращения 24.08.2017).

12. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2011 году. URL: http://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/3b3/ezhegodnik_ro_2011.pdf (режим доступа: свободный. Дата обращения 2.09.2017).

13. «Уральский Чернобыль»: Кыштымская авария. URL: <https://lastday.club/yadernaya-avariya-na-kombinate-mayak-ili-kyishtyimskaya-tragediya> (режим доступа: свободный. Дата обращения 02.09.2017).

14. Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение Маяк». URL: <http://www.po-mayak.ru/wps/wcm/connect/mayak/site/About/activities/ecology> (режим доступа: свободный. Дата обращения 02.09.2017).

*Поступила в редакцию
26.05.2018*

УДК 539.12

Г. Н. Тимошенко, Я. А. Горячева

Радиационные риски профессионального хронического облучения сотрудников Производственного объединения «Маяк»

Сотрудники Производственного объединения «Маяк» работают в радиационно-вредных и особо вредных условиях труда и подвергаются хроническому внешнему и внутреннему облучению. В данной работе рассматриваются показатели заболеваемости и смертности работников ПО «Маяк», подвергшихся профессиональному пролонгированному облучению, в зависимости от радиационных и нерадиационных факторов.

Ключевые слова: радиационный риск, хроническое облучение, заболеваемость, персонал, ПО «Маяк».

Об авторах

Тимошенко Геннадий Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры биофизики государственного университета «Дубна», старший научный сотрудник.

Горячева Яна Алексеевна – студент-магистр кафедры экологии и наук о Земле государственного университета «Дубна». *E-mail:* yana_sprouse@mail.ru. Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, д. 19.

Производственное объединение «Маяк» является ведущим и старейшим (с 1948 г.) предприятием ядерного оружейного комплекса России. Неблагоприятная радиационная обстановка и сверхнормативное облучение части персонала в первые годы деятельности предприятия «Маяк» приводили к высокому уровню профессиональной заболеваемости. Уровни профессионального облучения работников предприятия в первые годы его деятельности нередко превышали предельно допустимые как при проведении рутинных работ, так и при ликвидации последствий нештатных ситуаций. В случаях нештатных ситуаций экспозиционная доза гамма-излучения составляла 30–100 Р¹, а в некоторых случаях – 200 Р. [4]. Сотрудники, непосредственно подвергшиеся облучению в нештатной ситуации (главным образом, самоподдерживающейся цепной реакции деления) получали гораздо большие дозы гамма-

нейтронного излучения, зачастую приводящие к летальным исходам.

Заболеваемость раком желудка у работников ПО «Маяк»

Рак желудка (РЖ) относится к наиболее распространенным злокачественным новообразованиям, занимает четвертое место в структуре онкологической заболеваемости и второе место в структуре онкологической смертности в мире.

Повышенный риск РЖ обнаружен у работников, подвергшихся воздействию шестивалентных соединений хрома, никеля, асбестосодержащей пыли, полихлорированных ароматических углеводородов в высоких концентрациях и некоторых других веществ.

В период ввода в эксплуатацию и совершенствования технологического процесса персонал ПО «Маяк», первого в России предприятия атомной промышленности, подвергался пролонгированному общему внешнему гамма-облучению, а также внутреннему альфа-облучению за счет ингаляционного поступления плутония в значительных количествах, которые в ряде случаев существенно превышали допустимые пределы, установленные нормативами, а также уровни облучения работников аналогичных предприятий за рубежом [3].

Спустя 10–15 лет после пуска ПО «Маяк» было отмечено увеличение частоты злокачественных новообразований, в том числе и РЖ, у работников, подвергшихся радиационному воздействию в высоких дозах, по сравнению с необлученными жителями города, расположен-

¹ Статистический материал статьи охватывает длительный период времени. Этим обусловлено употребление устаревших терминов и величин при цитировании литературных данных. Современные единицы дозы – грей для поглощенной дозы (1 Гр = 100 рад) и зиверт для эффективной эквивалентной дозы. Для гамма-излучения 1 Р ≈ 0,0098 Зв.

ного в непосредственной близости от этого предприятия, и статистикой бывшего Советского Союза [7].

У персонала ПО «Маяк» было также обнаружено повышение частоты РЖ от 0,24 до 0,5% с увеличением дозы облучения в диапазоне от 5 до 400–600 рад (при мощности дозы от 5 до 200 рад/год). РЖ является полиэтиологичным заболеванием, поэтому для более точной и объективной оценки его связи с воздействием ионизирующей радиации необходимо также учитывать влияние нерадиационных факторов.

Данные о суммарных дозах облучения, индексе курения и других его характеристиках, употреблении алкоголя, а также о заболеваемости работников, заболевших РЖ, и их напарников из группы контроля оценивались на момент диагностики опухоли после завершения формирования основной и контрольной группы и, следовательно, не могли повлиять на подбор контроля [3].

Среди исследуемого контингента персонал радиохимического производства составлял 55,7%; плутониевого – 23,6%; реакторного – 13,4%; прочих производств – 7,3%. Большая часть работников (67,6%) начала трудовую деятельность на предприятии в период с 1949 по 1957 гг., когда радиационное воздействие было наиболее высоким.

При статистической обработке результатов использовались методы однофакторного и многофакторного анализа. Сравнение средних значений в группах осуществлялось с помощью критерия Стьюдента (t), а если распределение переменных отличалось от нормального, применялся непараметрический критерий U Манна–Уитни. Для оценки величины риска использовался показатель, называемый отношением шансов (ОШ). На основе многофакторной условной логистической регрессии получены аджустированные отношения шансов (ОШ_{ад}), позволяющие учесть влияние каждого фактора при фиксированных уровнях других исследуемых факторов. Для ОШ и ОШ_{ад} рассчитывался 95%-ный доверительный интервал. Был принят 5%-ный уровень значимости. Вычислялся также показатель, называемый популяционным атрибутивным риском (АР), свидетельствующий о количестве дополнительных случаев заболевания, обусловленных влиянием исследуемого фактора.

В основной группе средний возраст на момент диагностики РЖ составил $53,1 \pm 0,8$ го-

да, а продолжительность периода от начала работы на ПО «Маяк» до установления диагноза – $24,5 \pm 0,7$ года. У большинства работников (62,8%) опухоль желудка имела дистальную локализацию, в 14,8% случаев отмечалось новообразование кардиального отдела, у 14 человек (7,1%) на момент диагностики наблюдалось тотальное поражение органа, в 15,3% случаев в медицинской документации сохранились сведения только о морфологии опухоли, но не была указана ее локализация.

Известно, что при длительном персистировании *H. pylori* происходит подавление желудочной секреции, развивается атрофия и метаплазия желудочного эпителия, что способствует злокачественной трансформации. Согласно различным оценкам, в зависимости от штамма возбудителя и длительности инфицирования *H. pylori* риск РЖ увеличивается в 2,6 раз. Атрофия и кишечная метаплазия желудочного эпителия также повышают вероятность опухолевого процесса [3].

В исследованиях прошлых лет, выполненных среди персонала ПО «Маяк», было отмечено увеличение частоты гипосекреторных состояний, а также атрофических изменений слизистой оболочки желудка у работников, подвергшихся общему внешнему гамма-облучению в суммарной дозе более 200 Р.

Относительный риск возникновения РЖ составил 4,35; но его величина лишь приближалась к уровню статистической значимости ($p=0,12$).

При многофакторном анализе влияние пролонгированного общего внешнего гамма-облучения на заболеваемость РЖ было обнаружено только при кумулятивной дозе в диапазоне от 3,0 до 8,5 Гр; средняя доза общего внешнего гамма-облучения в этом интервале составляла 4,78 Гр, а ОШ_{ад} было равно 2,63 (ДИ 95%: 1,33–5,18).

Дозы общего внешнего гамма-облучения работников ПО «Маяк», начавших трудовую деятельность в первые годы работы предприятия, значительно превышали дозы облучения персонала аналогичных производств за рубежом [3].

При многофакторном анализе также не было обнаружено влияния на заболеваемость РЖ предшествующего контакта с химическими агентами, но и количество работников, подвергавшихся такому воздействию до начала трудо-

вой деятельности на ПО «Маяк», было невелико (8,8%).

Было установлено, что у работников ПО «Маяк», являющихся курильщиками, вероятность возникновения РЖ повышена в 2,10 раза (ДИ 95%: 1,42–3,12), АР курения составил 20%. Близкие оценки получены при исследовании в Норвегии, охватывавшем 18-летний период наблюдения: у выкуривающих ежедневно большое количество сигарет по сравнению с некурящими риск развития РЖ был увеличен в два раза, а популяционный АР составил приблизительно 18,4%. Также было обнаружено достоверное увеличение вероятности возникновения РЖ в 1,64 раза (ДИ 95%: 1,06–2,53), связанное со злоупотреблением алкоголем, а АР составил около 9%.

Величина АР свидетельствовала о том, что наибольший вклад в заболеваемость РЖ у персонала ПО «Маяк» вносили нерадиационные факторы: хронические гастриты с секреторной недостаточностью и язвенная болезнь желудка, на долю которых приходилось 24% случаев рака; курением могло быть обусловлено около 20% новообразований желудка; около 9% опухолей могло быть связано со злоупотреблением алкоголем. Приблизительно 5% случаев РЖ могло быть вызвано влиянием пролонгированного общего внешнего гамма-облучения в кумулятивной дозе более 3,0 Гр. [4].

Выводы

1. В результате ретроспективного исследования, выполненного методом «случай–контроль», обнаружено достоверное увеличение риска РЖ в 2,6 раза при суммарной дозе пролонгированного общего внешнего гамма-облучения более 3,0 Гр; вклад этого фактора в заболеваемость РЖ работников ПО «Маяк» составил около 5%.

2. Не выявлено связи между ингаляционным поступлением ^{239}Pu и заболеваемостью РЖ у персонала ПО «Маяк» при содержании радионуклида в организме от 0 до 39,60 кБк.

3. Преимущественное влияние на заболеваемость РЖ у работников ПО «Маяк» оказывали нерадиационные факторы:

– наиболее высокая вероятность возникновения новообразования обнаружена при хронических гастритах с секреторной недостаточностью ($\text{ОШ}_{\text{ад}} = 4,9$) и язвенной болезни желудка ($\text{ОШ}_{\text{ад}} = 3,2$), которыми в общей сложности

могло быть обусловлено около 24% случаев заболевания:

– текущее курение увеличивало риск РЖ в 2,1 раза и могло вызвать 20% злокачественных новообразований;

– злоупотребление алкоголем повышало вероятность заболевания РЖ в 1,6 раза и могло способствовать возникновению 9% опухолей [3].

Заболеваемость раком печени у работников ПО «Маяк»

В экспериментальных работах, а также в исследованиях среди людей, подвергшихся внешнему и внутреннему облучению, установлено, что печень является относительно радиорезистентным органом. В это же время при больших дозах, особенно при внутреннем облучении от гепатотропных радионуклидов, отмечен ряд проявлений радиационного повреждения (радиационный гепатит, склеротические изменения и возникновения опухолей). Наиболее исчерпывающие сведения по радиационно-индуцированным опухолям печени накоплены в эпидемиологических исследованиях среди людей, которым с диагностической целью вводили торотрас, основанный на диоксиде тория (радиофармпрепарат, использовавшийся ранее для контрастного усиления). ^{239}Pu , как и ^{232}Th , является одним из гепатотропных альфа-излучающих радионуклидов. Впервые возникновение злокачественных опухолей печени у работников плутониевого производства описано в работах Мигунова Н.И., Мороз Г.С., Окладникова Н.Д. 70-х гг. XX в. [1].

Однако частота опухолей в этих исследованиях оценивалась на основе относительно малочисленных выборок персонала ПО «Маяк», и период наблюдения охватывал менее 30 лет. В тоже время, в исследованиях среди пациентов, которым вводился торотраст, установлено, что средний латентный период (время от введения торотраста до смерти) составляет для различных гистологических типов опухолей 30–37 лет.

В Южно-Уральском институте биофизики был создан и поддерживается Регистр работников ПО «Маяк», подвергавшихся внешнему и внутреннему радиационному воздействию в широком диапазоне доз. Регистр включает всех людей, приступивших к работе на ПО «Маяк» в период 1948–1972 гг. Для настоящего исследования выбраны лица, начавшие работать в 1948–1958 гг., т.к. эта группа является

критической по уровню облучения и наиболее подходящей по срокам наблюдения.

Была изучена смертность персонала, работавшего на трех типах производств: объект А – промышленные атомные реакторы; объект Б – заводы по радиохимическому выделению плутония из облученного урана; объект В – завод по получению стандартного плутония. Для работников атомных реакторов основным видом радиационного воздействия является внешнее гамма-облучение [8].

На объектах Б и В, кроме внешнего облучения, могло иметь место ингаляционное поступление плутония. Сведения о дозах внешнего гамма-облучения получены в отделе техники

безопасности по данным индивидуального фотопленочного контроля.

Количественная характеристика изучаемой когорты персонала и данные о дозах внешнего гамма-облучения представлены в табл. 1.

Дозы внутреннего альфа-облучения рассчитывались на основе данных об уровне экскреции плутония с мочой и результатов посмертной радиометрии органов. Имеются данные о дозах внутреннего альфа-облучения для 2412 человек из числа начавших работать до 1958 г. Количественная характеристика группы персонала, прошедшего биофизическое обследование, данные о дозах на печень и распределение персонала в зависимости от дозы представлены в табл. 2, 3.

Таблица 1. Количественная характеристика изучаемого персонала и средние значения доз внешнего гамма-облучения [8]

Характеристика персонала	Пол	Место работы (объект)			
		А	Б	В	А+Б+В
Всего людей	М	2344 (97,29±2,23)	3929 (168,51±2,23)	2126 (67,91±1,72)	8399 (128,33±0,99)
	Ж	829 (37,95±4,26)	1561 (156,63±3,26)	1058 (74,36±3,42)	3448 (111,12±2,03)
Из них с известным жизненным статусом	М	1978 (102,39±2,41)	3342 (172,59±2,48)	1853 (70,04±1,88)	7173 (131,56±1,23)
	Ж	705 (39,98±4,68)	1349 (165,41±3,66)	924 (77,06±3,73)	2978 (115,33±2,22)
Число человеко-лет наблюдателя	М	70440	114387	62363	247190
	Ж	26957	53061	35055	115073
Число умерших от всех опухолей	М	174 (119,04±9,92)	334 (249,79±9,97)	248 (118,75±6,30)	756 (182,69±6,04)
	Ж	48 (46,60±25,22)	78 (197,88±15,93)	99 (158,50±11,60)	225 (149,76±9,41)
Число умерших от злокачественных опухолей печени	М	10 (72,20±17,28)	13 (348,15±78,35)	9 (220,73±51,91)	32 (226,44±42,42)
	Ж	2 (11,32±9,44)	2 (212,97±102,85)	12 (197,59±19,87)	16 (176,23±22,62)

*Примечание: в скобках даны средние значения доз ($M \pm m$) внешнего гамма-облучения (сГр).

Таблица 2. Характеристика группы персонала, имеющего данные биофизического обследования, и средние значения накопленных доз альфа-гамма-облучения печени [7]

Показатель	Мужчины	Женщины
Люди с известным жизненным статусом	1662 (725,03±189,27)	750 (1100,45±344,91)
Число человеко-лет наблюдения	59465	29576
Число умерших от опухолей	244	70
Число умерших от злокачественных опухолей печени	8	10

*Примечание: в скобках даны средние значения доз ($M \pm m$) альфа-гамма-облучения печени (сЗв).

Таблица 3. Распределение персонала, имеющего данные биофизического обследования, в зависимости от дозы альфа-гамма-облучения печени [8]

Показатель	Доза (сЗв)			
	Менее 750		750 и более	
	М	Ж	М	Ж
Число людей	1309	579	353	171
Среднее значение дозы (M±m)	266,6±3,0	301,5±5,1	2439,6±522,3	3805,0±844,7
Удельный вклад альфа-составляющей (%)	50,8	54,8	77,8	81,7
Удельный вклад гамма-составляющей (%)	49,2	45,2	22,2	18,3

В качестве границы дозовых градаций (табл. 3) принята доза 7,5 Зв – значение накопленной дозы за пятьдесят лет работы при облучении на уровне предельно допустимой дозы (ПДД)², действовавшей в период 1953–1960 гг. В нижнюю дозовую градацию вошли 78% лиц, имеющих данные биофизического обследования. В этой градации альфа- и гамма-составляющие вносят равный вклад в общую альфа-гамма-дозу облучения печени, тогда как в верхней дозовой градации, включающей 22% персонала, удельный вклад альфа-составляющей примерно в 4 раза выше, чем гамма-составляющей [8].

Более строгим является сравнение смертности среди изучаемого персонала с таковой в группе «внутреннего контроля». Такое сравнение было проведено по показателям стандартизованного относительного риска (табл. 4), которые показывают, какую долю от

ожидаемой составляет смертность, наблюдаемая в изучаемой группе персонала. Показатели СОР свидетельствуют о том, что смертность от рака печени среди работников всех и отдельных объектов выше, чем в контрольной группе, как у мужчин, так и у женщин, но превышение является достоверным только у женщин, и это обусловлено повышенной смертностью среди женщин-работниц завода. В табл. 4 уровень смертности от злокачественных опухолей печени у женщин-работниц завода В достоверно выше такового в контрольной группе и среди работниц других заводов. Более того, на объекте В смертность женщин превысила смертность мужчин, тогда как обычно опухоли этой локализации у мужчин встречаются чаще [1]. Объяснением этого факта служат данные о дозах облучения печени.

Таблица 4. Показатели смертности от злокачественных новообразований печени среди работников ПО «Маяк» (по состоянию на 01.01.93 г.) [8]

Показатель смертности	Пол	Место работы (объект)			
		А	Б	В	А+Б+В
Общий показатель, M±m	М	14,2±4,5	11,4±3,1	14,4±4,8	13,0±2,3
	Ж	7,4±5,2	3,8±2,7	34,2±9,9	13,9±3,5
Стандартизованный показатель, M±m	М	7,8±3,3	8,0±2,6	7,7±3,5	7,8±1,8
	Ж	7,6±5,3	4,0±2,7	32,6±9,6	14,1±3,5
Наблюдаемое число умерших	М	10	13	9	32
	Ж	2	2	12	16
Ожидаемое число умерших	М	6,90	8,73	6,29	21,92
	Ж	1,08	2,05	1,50	4,61
СОР (95% доверительный интервал)	М	1,45	1,49	1,43	1,46
		(0,55–3,81)	(0,63–3,51)	(0,52–3,96)	(0,85–2,51)
	Ж	1,86	0,98	8,01	3,47
		(0,18–19,31)	(0,14–6,86)	(1,47–43,69)	(1,23–9,76)

²Значения предельной дозы неоднократно пересматривались в сторону ее снижения. В настоящее время эффективная доза для персонала не должна превышать 1 Зв за период трудовой деятельности (50 лет).

Среднее значение дозы на печень для женщин, работавших на заводе В, составило 2048 сЗв, что в 2,3 раза выше соответствующего значения у мужчин, работавших на этом же

заводе (879 сЗв), и в 3–4 раза выше, чем у работников завода Б (651 сЗв у мужчин и 496 сЗв у женщин). Следует отметить, что здесь приведены дозовые характеристики только для лиц, прошедших биофизическое обследование. Такое обследование проводилось выборочно. Больше шансов войти в эту выборку, особенно в первые годы, имели лица, работавшие на участках, где поступление плутония в организм было наибольшим. Следовательно, в случае сплошного биофизического обследования, если бы такое было проведено, средние значения дозы на печень, по-видимому, изменились бы в сторону некоторого уменьшения, но соотношение доз, вероятнее всего, осталось бы прежним. Наименьшие дозы на печень получили работники реакторов, для которых доза внешнего гамма-облучения всего тела может характеризовать дозу на печень. Среднее значение дозы у мужчин составило 103 сЗв, у женщин – 40 сЗв [8].

Наибольший интерес представляет сравнение данных с результатами эпидемиологических исследований среди людей, которым с диагностической целью вводился торотраст, поскольку в обоих случаях имела место инкорпорация альфа-излучающего радионуклида [10].

Распределение опухолей печени по гистологическому типу у изучаемого персонала отличалось от такового у больных, которым вводился торотраст. Имеются данные гистологического исследования для 30 случаев из 48 умерших от злокачественных опухолей печени. Гепатоцеллюлярный рак обнаружен в 53% случаев. В торотрастовой группе этот тип рака встречался реже других типов и составлял 16–22%, в то время как холангиоцеллюлярный рак был диагностирован у 36–71% умерших. Холангиоцеллюлярный рак выявлен всего в 16,7% случаев и только у мужчин. Очень близкой оказалась частота гемангиоэндотелиом в сравниваемых группах: 26,7% в группе изучаемого персонала и 17–29% в «торотрастовой» группе [5].

Таким образом, исследование подтвердило полученные ранее данные об увеличении смертности от злокачественных опухолей печени среди персонала плутониевого производства, которое обусловлено, главным образом, высокой частотой гемангиоэндотелиом в основном при дозах, в десятки раз превышающих ПДД.

Выводы

Смертность от злокачественных опухолей печени среди персонала ПО «Маяк», рабо-

тавшего в период освоения производства и подвергавшегося внешнему и внутреннему облучению в дозах, превышающих допустимые. Смертность среди этого персонала за 35–45 лет наблюдения составляет 13–14 на 10^5 чел./год для мужчин и женщин соответственно и достигает максимальных значений для опухолей этой локализации по литературным данным. Превышение наблюдаемой смертности над ожидаемой имело место на всех объектах, но достоверным это превышение является только для женщин-работниц плутониевого производства. Увеличение смертности среди работниц плутониевого производства обусловлено, главным образом, гемангиоэндотелиомами, возникшими при дозах в среднем 150 Зв. Избыточный относительный риск первичных злокачественных новообразований печени для лиц обоего пола составил 0,23 на 1 Зв сочетанного альфа-гамма-облучения печени.

Показатели заболеваемости и смертности от острого инфаркта миокарда в когорте рабочих ПО «Маяк»

Острый инфаркт миокарда (ОИМ) – одна из наиболее тяжелых острых форм ишемической болезни сердца, имеет высокую летальность (35%) и высокий процент осложнений с длительной нетрудоспособностью.

Результаты анализа заболеваемости и смертности от ОИМ в когорте работников ПО «Маяк» в зависимости от суммарной дозы внешнего гамма-облучения и содержания в организме Pu-239 представлены в табл. 5 и 6. Установлено, что заболеваемость и смертность от ОИМ были выше ($p < 0,05$) у мужчин изучаемой когорты, подвергшихся пролонгированному внешнему гамма-облучению в суммарной дозе более 1,0 Гр; причем, наиболее значимо у мужчин радиохимического (РХ) завода (табл. 5) [2].

У женщин, работавших на радиохимическом (РХ) и плутониевом заводах и подвергшихся пролонгированному внешнему гамма-облучению в суммарной дозе $> 1,0$ Гр, только заболеваемость, но не смертность от ОИМ была выше ($p < 0,05$) по сравнению с теми, кто подвергся облучению в более низких дозах. Ранее было показано, что у работников РХ завода заболеваемость ОИМ была выше, чем у жителей г. Озерска, расположенного вблизи ПО «Маяк» [4]. Был отмечен рост числа случаев внезапной коронарной смерти у работников ПО «Маяк» [5].

В другом исследовании было выявлено увеличение показателя смертности от ИБС у работников, подвергшихся внешнему гамма-облучению в суммарной дозе более 1,0 Гр [17]. В результате проведенного анализа было выявлено, что заболеваемость и смертность от ОИМ были выше у мужчин всей когорты с содержанием ²³⁹Pu в организме более 1,48 кБк и, в большей степени, у мужчин РХ завода (табл. 6). У женщин не было установлено влияния внутреннего облучения от инкорпорированного

плутония на смертность от ОИМ, что можно объяснить малым числом случаев смерти в группах с измеренным содержанием плутония в организме и, как следствие, недостаточной статистической мощностью исследования. Обнаруженные более высокие показатели заболеваемости и смертности от ОИМ у работников РХ завода, возможно, были обусловлены другими неучтенными производственными факторами, и в первую очередь, химическим.

Таблица 5. Стандартизованные показатели заболеваемости и смертности от ОИМ в зависимости от суммарной дозы внешнего гамма-облучения с учетом пола работников и типа производства (на 10 000 работающих) [2]

Тип производства		Мужчины			Женщины		
		< 0,5 Гр	0,5–1,0 Гр	> 1,0 Гр	< 0,5 Гр	0,5–1,0 Гр	> 1,0 Гр
Показатели смертности	реакторный завод	9,39±0,97	5,24±0,95	9,02±1,26	2,47±0,64	0,00±0,00	8,93±4,69
	плутоневый завод	10,74±0,77	6,79±1,61	13,11±2,46	3,34±0,63	6,1±2,15	2,16±1,84
	радиохимический завод	3,49±0,96	8,1±1,08	12,5±0,77*	2,66±0,79	2,3±0,85	4,01±0,81
	вся когорта	8,38±0,79	6,77±1,10	11,43±0,31*	2,91±0,61	3,29±1,11	4,12±1,06
Показатели заболеваемости	реакторный завод	34,77±1,94	27,83±2,38	37,84±2,41	9,79±1,26	16,43±4,0	0 ± 0
	плутоневый завод	28,54±1,4	28,03±3,36	33,2±4,2	11,65±1,24	2,97±1,39	19,1±1,53*
	радиохимический завод	15,4±3,16	27,25±3,41	32,75±2,61*	8,97±1,53	4,69±1,2	13,38±1,45*
	вся когорта	26,14±2,11	27,25±3,41	32,75±2,61*	10,53±1,3	6,26±1,91	13,95±1,4

*отмечены достоверные различия

Таблица 6. Стандартизованные показатели заболеваемости и смертности от ОИМ в зависимости от уровня содержания Pu-239 в организме с учетом пола работников и типа производства (на 10 000 работающих) [2]

Тип производства		Мужчины, кБк			Женщины, кБк		
		< 0,74	0,74–1,48	> 1,48	< 0,74	0,74–1,48	> 1,48
Показатели смертности	реакторный завод	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00
	плутониевый завод	8,22±2,14	14,11±3,6	14,38±3,80	1,75±1,25	3,58±2,57	4,33±2,59
	радиохимический завод	6,25±1,31	6,83±2,78	20,6±4,10*	2,59±1,0	6,64±3,82	12,32±4,90
	вся когорта	8,17±1,15	9,21±2,63	17,90±2,80*	2,33±0,78	5,51±2,75	6,44±2,71
Показатели заболеваемости	реакторный завод	49,53± 8,23	51,49±33,15	95,69±49,75	14,53±6,7	0±0	0±0
	плутониевый завод	29,99±4,26	30,03±5,43	45,53±4,11*	9,06±2,97	5,93±4,0	12,11±3,42
	радиохимический завод	30,99±2,99	31,98±4,14	45,35±3,86*	11,85±2,20	21,28±4,66	3,28±2,92
	вся когорта	33,02±2,38	31,65±4,95	45,67±4,66*	11,16±1,76	15,93±4,28	9,83±3,14

*отмечены достоверные различия

Выводы

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о статистически значимом влиянии как нерадиационных, так и радиационных факторов на заболеваемость и смертность от ОИМ в когорте работников ПО «Маяк», впервые нанятых на предприятие в период 1948–1958 гг. и подвергшихся профессиональному пролонгированному внешнему и/или внутреннему облучению от инкорпорированного плутония. Показатели заболеваемости и смертности от ОИМ статистически значимо зависели от пола, возраста, курения, артериальной гипертонии и повышенной массы тела работников. Показатели заболеваемости и смертности от ОИМ были выше у работников, подвергшихся пролонгированному внешнему гамма-облучению в суммарной дозе более 1,0 Гр, и у мужчин с измеренным содержанием ^{239}Pu в организме более 1,48 кБк по сравнению с теми, кто подвергался облучению в более низких дозах.

Заключение

По результатам исследований было выяснено, что для 671 из 810 (83%) проанализированных случаев злокачественных опухолей у работников ПО «Маяк», большинство из которых начали работу в период пуска и освоения производства, была выявлена связь заболевания с одним или несколькими (от одного до четырех) факторами риска. В 139 случаях влияния исследуемых факторов выявлено не было [4].

Частота выявления экспозиционных факторов, т.е. факторов риска опухолей, была весьма различной для отдельных факторов и для различной локализации опухолей: наибольшая для курения – 53 (91%), затем для алкоголя – 14 (41%) и хронических болезней – 2 (57%) и наименьшая – для инкорпорации ^{239}Pu – 9 (37%) и внешнего гамма-облучения – 6 (37%).

Наибольшая канцерогенность, представленная в виде относительного риска (ОР), была выявлена для инкорпорации ^{239}Pu (ОР = 8,0), затем для курения (2,9) и хронических болезней (2,8) и близкая – для внешнего гамма-облучения (2,5) и злоупотребления алкоголем (2,2).

Популяционный атрибутивный риск, характеризующий дополнительную заболеваемость в популяции, связанную с исследуемым фактором риска, был наибольшим для курения – 25–73%, одинаковым – 0–29% для инкорпорации ^{239}Pu , злоупотребления алкоголем и хронических болезней и наименьшим для

внешнего гамма-облучения – AP 3–18%. Количественное распределение опухолей, рассчитанное на основе оценки атрибутивного риска, свидетельствовало, что из 671 опухоли, обнаруживших связь с факторами риска, только 21% (140) могли быть обусловлены радиационным воздействием: 12% (79) – инкорпорацией ^{239}Pu и 9% (61) внешним гамма-облучением: 25% (168) – хроническими заболеваниями, преимущественно гастритами со сниженной секреторной функцией и язвами желудка — 14% (94) и хроническими обструктивными заболеваниями легких — 11% (74). Наибольшее же количество опухолей 54% (363) было обусловлено вредными привычками, главным образом, курением – 41% (273), алкоголем – 13% (90) [6].

Мероприятия по снижению онкологической заболеваемости у работников атомной промышленности должны быть направлены [5]:

1) на строгое исполнение норм радиационной безопасности, а также регулирование численности персонала, относящегося к группе потенциального риска, т.е. на предупреждение случаев переоблучения;

2) улучшение диагностики и лечения хронических заболеваний желудка (гастритов с секреторной недостаточностью и язв) и хронических обструктивных заболеваний легких;

3) особенно важным является уменьшение числа курильщиков и злоупотребляющих алкоголем среди молодых работников, т.к. именно эти категории могут обусловить в ближайшее время основное количество злокачественных опухолей.

Перспективным в этом отношении может стать проведение генотипирования (для выявления лиц с неблагоприятным полиморфизмом и мутациями), а также лечение лиц с никотиновой (наркотической) зависимостью в соответствующих врачебных кабинетах.

Библиографический список

1. Гранов А.М., Петровичев Н.Н. Первичный рак печени. Л.: Медицина, 1977. 244 с.
2. Власенко Е.В., Азизова Т.В., Мосеева М.Б., Григорьева Е.С., Осовец С.В., Гергенрейдер С.Н. Показатели заболеваемости и смертности от острого инфаркта миокарда в когорте рабочих ПО «Маяк»// Медицина труда и промышленная экология. 2012. № 8. С. 28–33.
3. Жунтова Г.В. Вклад профессионального облучения в заболеваемость раком желудка у работ-

ников ПО «Маяк»// Медицина труда и промышленная экология. 2009. № 8. С. 20–25.

4. Иванов В.К., Кайдалов О.В., Кашеева П.В., Корело А.М., Панфилов А.П., Василенко Е.К. Оценка индивидуальных радиационных рисков при различных сценариях профессионального хронического облучения// Радиация и риск. 2008. Т.17. № 2. С. 9–29.

5. Осипов М.В., Сокольников М.Э. Оценка вклада медицинского облучения в канцерогенный риск у работников ПО «Маяк»// REJR. 2016. 6 (2). С. 72–79.

6. Осовец С.В., Азизова Т.В., Дружинина М.Б., Недро В.С. Статический анализ распределения по дозам работников ПО «МАЯК» с хронической лучевой болезнью// Вопросы радиационной безопасности. 2006. № 2. С. 38–46.

7. Токарская З.Б., Окладникова Н.Д., Беляева З.Д. Оценка вклада радиационных и нерадиацион-

ных факторов в развитие рака легкого у работников радиохимического предприятия// Вопросы онкологии. 1994. № 4–5–6. С. 165–170.

8. Шильникова Н.С., Кошурникова Н.А., Болотникова М.Г., Нифатов А.П., Окатенко П.В., Хохряков В.Ф., Романов С.А. Смертность от злокачественных новообразований печени среди персонала ПО «Маяк»// Радиация и риск. 1995. № 5. С. 151–155.

9. Катастрофа на комбинате «МАЯК» 29 сентября 1957 г. – URL: <http://nuclear.tatar.mtss.ru/fa230907.htm> (режим доступа: свободный. Дата обращения: 07.09.17).

10. Рак печени – факторы риска рака печени. – URL: <http://www.xda.su/SIRTTherapy/LiverCancerLiverCancerRiskFactors/> (режим доступа: свободный. Дата обращения: 07.09.17).

*Поступила в редакцию
26.05.2018*

УДК 543.544

*И. Н. Фадейкина, А. В. Огурцова***Модификация поверхности сорбентов полианилином**

Рассматриваются возможности проведения модификации полианилином ряда сорбентов и исследование их физико-химических характеристик. Использована методика химического синтеза полианилина на поверхности выбранных для исследований сорбентов (силикагель, Al_2O_3 , TiO_2), исследованы основные сорбционные характеристики полученных модифицированных материалов с помощью ИК-Фурье спектроскопии, оптической микроскопии, методом окситермографии, определена адсорбционная активность по йоду.

Ключевые слова: полупроводниковые материалы, полианилин, полимеры, силикагель, Al_2O_3 , TiO_2 , сорбенты.

Об авторах

Фадейкина Ирина Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры химии, новых технологий и материалов государственного университета «Дубна». *E-mail:* i.fadeikina@yandex.ru. 141980 Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская 19.

Огурцова Анна Владиславовна – студент 4-го курса кафедры химии, новых технологий и материалов государственного университета «Дубна».

Эффективные и недорогие сорбенты широкого профиля крайне востребованы во многих отраслях. Одним из вариантов улучшения сорбционных характеристик материалов является их модифицирование. Многие распространенные неорганические минеральные сорбенты (силикагели, алюмогели, глины, цеолиты) мало пригодны для сорбции неполярных веществ, в том числе нефтепродуктов, из влажной среды вследствие гидрофильности. Изменение сорбционных свойств возможно путем проведения модифицирования сорбентов гидрофобными органическими материалами [13].

Одним из возможных материалов для проведения модификации является полианилин.

Полианилин (ПАНИ) – известный и перспективный электропроводящий полимер (*conducting polymer*), который активно исследуется с момента открытия его полупроводниковых свойств [7]. Несомненным достоинством ПАНИ является то, что он устойчив к воздействию влаги и кислорода воздуха, его синтез является достаточно простым, а используемый мономер – дешевым.

Кроме использования полупроводниковых свойств на практике ПАНИ применяется в составе композиционных материалов. Причина в том, что ПАНИ имеет плохие механические свойства: полимер представляет собой поро-

шок, не обладающий адгезией к другим материалам. Поэтому второй компонент либо компоненты композита не только дополняют свойства электропроводящего полимера, но и выполняют функции носителя. Такими компонентами являются сорбенты.

Модификация сорбентов

Адсорбенты – это материалы с большой удельной поверхностью, на которой происходит адсорбция веществ из соприкасающихся с ней газов или жидкостей. Адсорбция появляется вследствие нескомпенсированности сил межмолекулярного взаимодействия на разделе фаз между молекулами адсорбента и адсорбата. Из-за этого количество поглощаемого вещества зависит от их свободной площади и свойств поверхности. Увеличение площади поверхности материалов может быть достигнуто различными методами, такими как измельчение, увеличение пористости и грануляция. Полученные таким образом соединения различаются не только уровнем развитости поверхности, но и механизмом осуществления сорбции. К ним относятся цеолиты, активированные угли, силикагели и др., а также природные минералы: глинистые и цеолитные породы. Модифицирование поверхности данных сорбентов определенными модификаторами позволяет увеличивать площадь поверхности, изменять гидрофильные/гидрофобные свойства материала, осуществлять селективную сорбцию.

В современной промышленности и научных исследованиях особое место среди сорбентов принадлежит силикагелю, представляющему собой высушенный гель кремниевой кислоты пористого строения с сильно развитой внутренней поверхностью. Химическая инертность, высокая термостойкость, легкость регулирования пористой структуры – весь этот комплекс свойств дает возможность приготовления на основе силикагеля сорбентов, катализаторов и носителей каталитически активного вещества с высокой удельной поверхностью при оптимальной пористости структуры.

Силикагель используется как носитель самых различных каталитически активных веществ – металлов Pt, Pd, Ni и другие, окислов,

кислот, оснований – для процессов окисления, гидратации, гидрирования, полимеризации, конденсации и многих других реакций. Силикагель способен к поглощению больших количеств воды. Наряду с водой силикагель хорошо сорбирует органические соединения различных классов: алифатические углеводороды (УВ) (н-гексан, н-октан и др.), ароматические (бензол, толуол), спирты (метанол, этанол). Поверхность силикагелей покрыта гидроксильными группами. От их количества и их концентрации на поверхности зависят адсорбционные и другие свойства силикагелей.

Модифицированные силикагели также способны эффективно связывать полиароматические УВ из водных растворов [5].

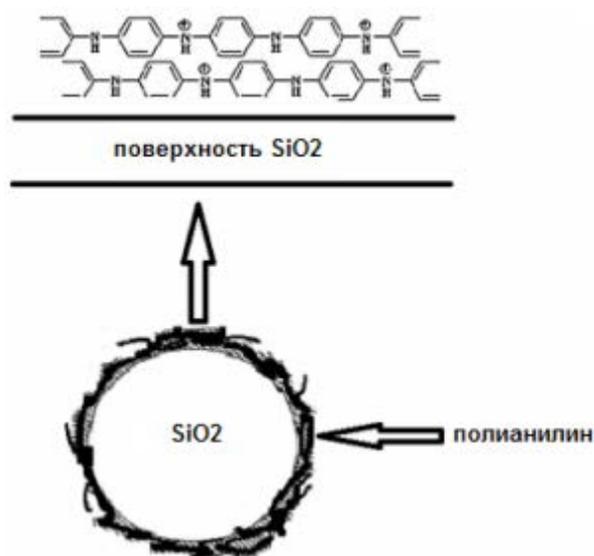


Рис. 1. Схема модифицированной поверхности силикагеля полианилином [8]

Другой не менее значимый сорбент – оксид алюминия. Чистый оксид алюминия может находиться в нескольких кристаллических формах: α - Al_2O_3 (корунд), γ - Al_2O_3 , δ - Al_2O_3 , θ - Al_2O_3 , χ - Al_2O_3 и др. Гамма-модификации оксида алюминия применяются в качестве носителя катализаторов, сырья для производства смешанных катализаторов, осушителя в различных процессах химических, нефтехимических производств (ГОСТ 8136-85). Эта форма представляет наибольший интерес [7]. Известно много работ по модификации и улучшению характеристик Al_2O_3 . Например, в [5] проводилась модификация углеродом оксида алюминия с заданной

мезо-, макропористой структурой, плотностью и прочностью, с гидрофильно-гидрофобной природой поверхности и с величиной удельной поверхности 150–350 $\text{м}^2/\text{г}$. Данный материал использовался для очистки биологических жидкостей и сред, водных растворов от органических соединений различных классов, бактериальных клеток, токсинов различной молекулярной массы. В другой работе [3] предложен сорбент для удаления окислов азота и серы, который имеет высокое значение удельной поверхности сорбента при совместном осаждении оксида кремния с оксидом алюминия из суспензии. В описанных вариантах улучшение

происходило либо за счет получения особой пористой структуры, либо за счет модификации неорганическими соединениями.

Другим востребованным сорбентом является диоксид титана. Оксид титана (IV) обладает высокой каталитической активностью, на его поверхности органические соединения (в том числе, опасные для человека монооксиды азота и углерода, содержащиеся в автомобильных выхлопах) разлагаются на углекислый газ и воду. Попытки улучшить свойства фотокатализаторов связаны с осаждением оксида титана, например на поверхность углеродных нанотру-

бок, золь-гель- или гидротермальными методами [13].

Экспериментальная часть

В работе проводились модификации силикагеля, диоксида титана и оксида алюминия путем химического окисления анилина и последующего осаждения полианилина (ПАНИ) на поверхности сорбентов.

Полианилин в работе получали методом окислительной полимеризации анилина (рис. 2).

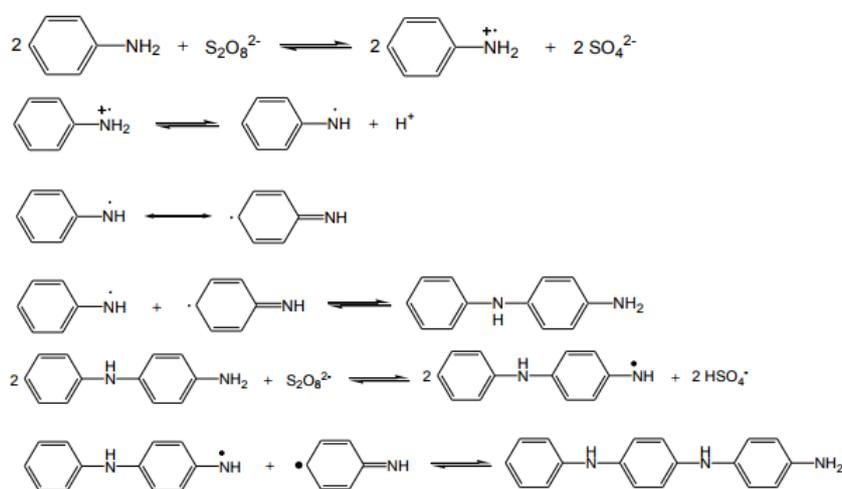


Рис. 2. Механизм окислительной полимеризации анилина

Модифицирование выбранных сорбентов проводили по следующей методике.

Брали навеску сорбента 1 г. Помещали в колбу с раствором подкисленного 0,1 М соляной кислотой анилина (осч., 99,9%, ГОСТ 62-53-3). Помещали на магнитную мешалку и по каплям прибавляли окислитель (раствор персульфата аммония, ч., ГОСТ 20478-75). После образцы высушивались в сушильном шкафу при температуре 50–60 °С. Таким образом, были получены модифицированные полианилином образцы диоксида титана TiO_2 (*dioxide, laboratory*

reagent grade, T/1900/53), силикагеля SiO_2 (КСКГ, фракция 0,063-0,20 мм, ГОСТ 3956-76) и оксида алюминия Al_2O_3 (ч., ТУ 6-09-3916-75).

Обсуждение и результаты

Полученные образцы были исследованы методом ИК-Фурье спектроскопии (*IRAffinity-1s, Shimadzu, МНПВО*). Полученные образцы были идентифицированы, были исследованы различия между модифицированными образцами и чистыми оксидами неметаллов.

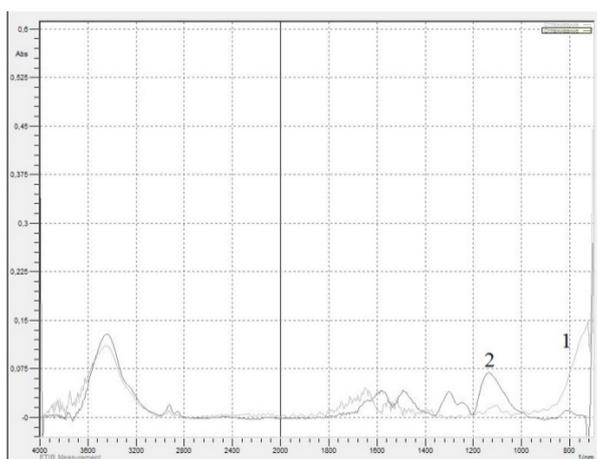


Рис. 3. ИК-спектры: 1 – спектр чистого оксида алюминия Al_2O_3 ; 2 – спектр оксида алюминия Al_2O_3 , модифицированный ПАНИ

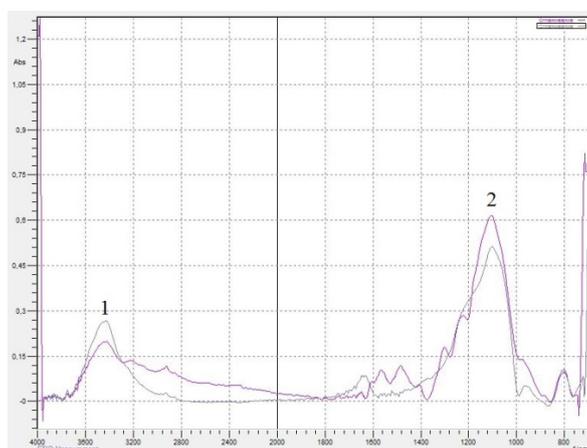


Рис. 4. ИК-спектры: 1 – спектр чистого силикагеля SiO_2 ; 2 – спектр силикагеля SiO_2 , модифицированный ПАНИ

Для всех трех вариантов синтеза на ИК спектрах получены характерные колебательные полосы. Из представленных данных видно, что для допированного полианилина характерны полосы 1570 см^{-1} – 1490 см^{-1} – деформационные колебания хиноидного и бензоидного колец; 1300 – 1100 см^{-1} – колебание связи $\text{C}-\text{N}$ и $\text{C}-\text{N}^+$ в структуре полианилина, а также вибрационные колебания протонированной иминогруппы, что хорошо согласуется с литературными данными [9].

В свою очередь для оксида алюминия характерны широкие полосы поглощения при 3300 – 3600 см^{-1} , отвечающие валентным колебаниям связей $\text{O}-\text{H}$ ассоциированных гидроксильных групп [8].

Для силикагеля наблюдаются полосы при 1090 см^{-1} – 803 см^{-1} , которые соответствуют

колебаниям связи $\text{Si}-\text{O}$ и $\text{Si}-\text{O}-\text{H}$. Очень широкий пик в диапазоне 3200 – 3700 см^{-1} является результатом наложения полос валентных колебаний гидроксильных групп и валентных колебаний адсорбированных молекул воды [14].

Образцы модифицированных сорбентов были исследованы методом окситермографии. Метод предполагает внесение точной навески образца с помощью кварцевой лодочки в высокотемпературную печь, где происходит окисление кислородом воздуха. Значение потребленного кислорода фиксируется твердоэлектродным электрохимическим детектором и позволяет определить массу органического вещества, внесенного в печь [9].

Для определения массы осажденного на поверхности сорбента полимера подобрали температурные режимы окисления образца

(рис. 5). Затем брали точные навески (~0,001; 0,003; 0,005; 0,008; 0,01 г) полимера и вносили в высокотемпературную область в соответ-

ствии с профилем нагрева, где происходило полное окисление кислородом. Полученные окситермограммы представлены на рис. 6.

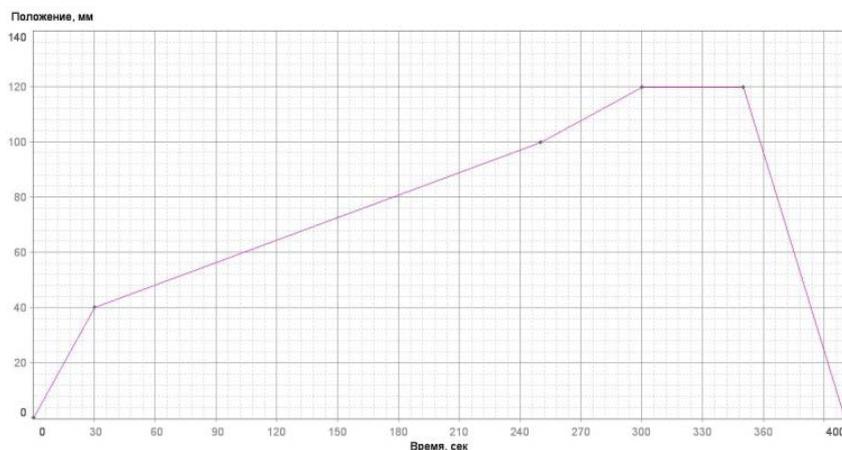


Рис. 5. Температурный профиль нагрева образцов

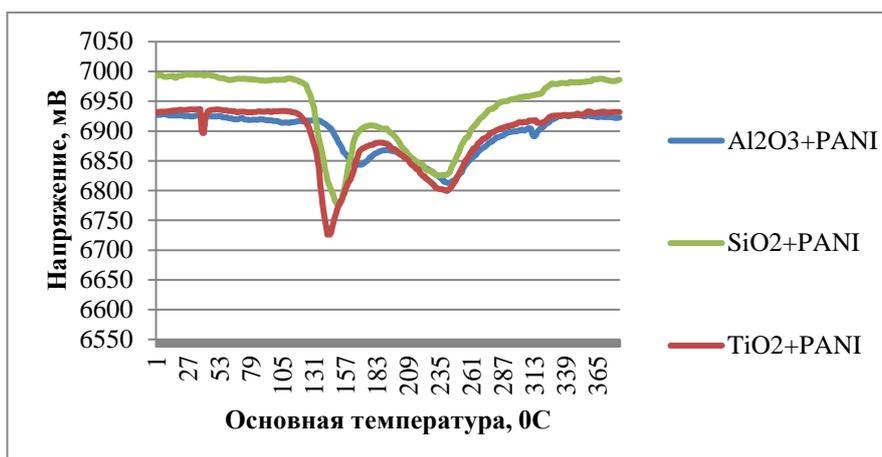


Рис. 6. Окситермограмма модифицированных сорбентов

На окситермограммах (см. рис. 6) можно наблюдать раздвоение пика. Возможно, данное явление объясняется тем, что полианилин имеет сложную структуру, и при его окислении образуются различные фракции, которые окисляются при разных температурах. На основании полученных окситермограмм был построен график зависимости площади пика от массы образцов (табл. 1 и рис. 7).

С помощью градуировочного графика (см. рис. 7) нами была определена масса осажденного модификатора на поверхности исследуемых сорбентов.

Модифицированные сорбенты исследовались методом оптической микроскопии, изображения частиц приведены на рис. 8.

Таблица 1. Зависимость площади пика от массы исследуемых образцов

	PANI(1)	PANI(2)	PANI(3)	PANI(4)	PANI(5)	Al ₂ O ₃ +PANI	SiO ₂ +PANI	TiO ₂ +PANI
<i>m</i> , г	0,001	0,003	0,005	0,008	0,01	0,005	0,005	0,005
S , мВ·мин	20041± ±1002,5	36137± ±1806,85	50955± ±2547,75	69096± ±3454,7	97214± ±4860,7	13344± ±667,2	17447± ±872,35	23066± ±1153,3

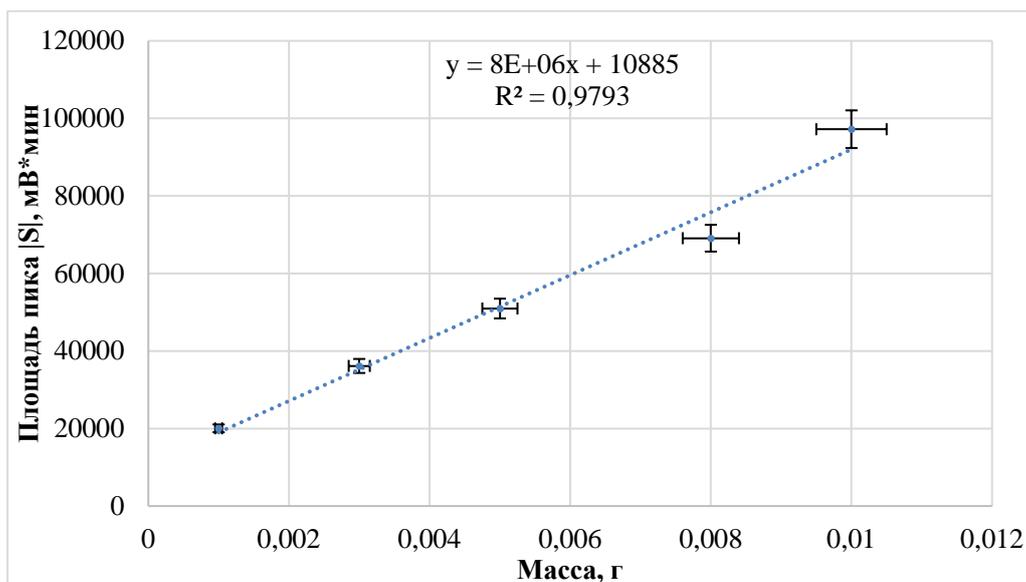


Рис. 7. График зависимости площади пика от массы полианилина

Таблица 2. Зависимость площади пика от рассчитанных масс осажденного полианилина на модифицированных сорбентах

	Al ₂ O ₃ +PANI	SiO ₂ +PANI	TiO ₂ +PANI
m PANI, г	3,1·10 ⁻⁴	8,2·10 ⁻⁴	2,8·10 ⁻³
S , мВ·мин	13344	17447	23066
m, пересчитанная на 1 г сорбента	0,060±0,003	0,16±0,08	0,56±0,03

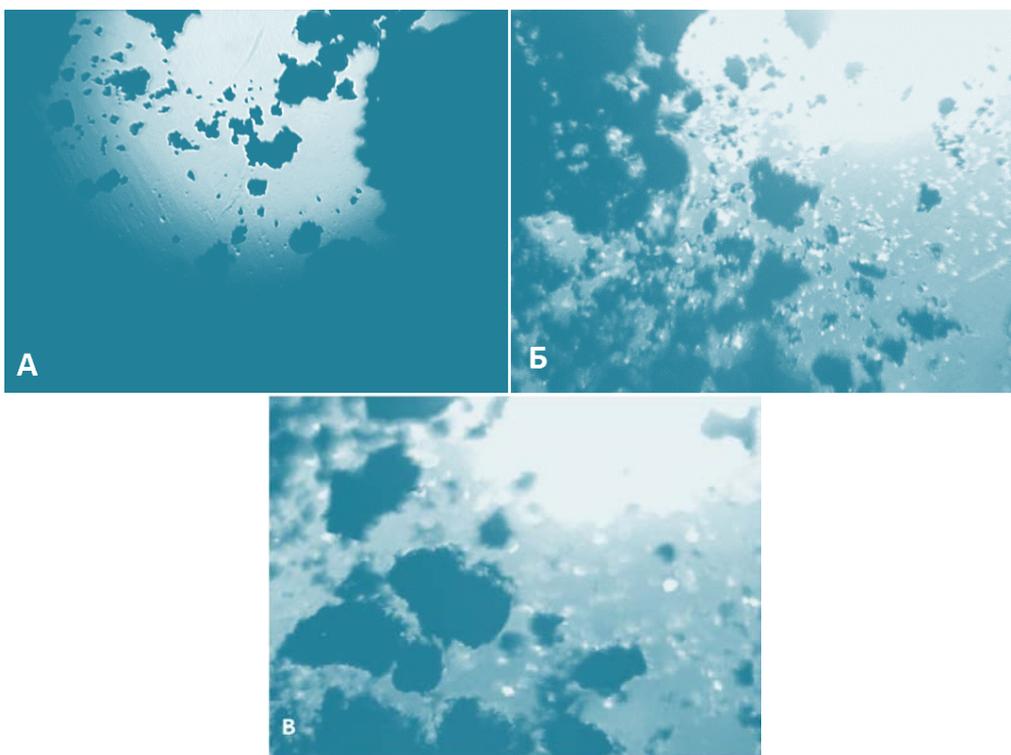


Рис. 8. Снимки с оптического микроскопа (×100): А – модифицированный оксид алюминия; Б – модифицированный силикагель; В – модифицированный диоксид титана (окончание)

На изображениях видно, что модифицированные частицы имеют примерно одинаковый размер и неровную пористую поверхность.

Основным параметром сорбционного материала является сорбционная емкость. Для определения данной характеристики использовался метод определения адсорбционной активности по йоду согласно ГОСТ 6217-74 [6].

Адсорбционная активность была вычислена по формуле:

$$X = \frac{V \cdot 0,0127 \cdot 100 \cdot 100}{10 \cdot m},$$

где V – разница объемов раствора тиосульфата натрия концентрации 0,1 н, израсходованный на титрование 10 мл раствора йода (6 мл) в йодистом калии и израсходованный на титрование оставшегося после сорбирования; 0,0127 – масса йода, соответствующая 1 мл раствора тиосульфата натрия концентрации 0,1 н, г.; m – масса навески.

Таблица 3. Результаты определения адсорбционной активности по йоду

Исследуемое вещество	V , мл	X , %
Al ₂ O ₃ (чист)	5,20±0,16	10,16
TiO ₂ (чист)	4,10±0,12	24,13
SiO ₂ (чист)	4,60 ±0,14	17,78
Al ₂ O ₃ +PANI	0,60 ±0,02	68,58
TiO ₂ +PANI	0,40 ±0,01	71,12
SiO ₂ +PANI	0,30 ±0,01	72,39

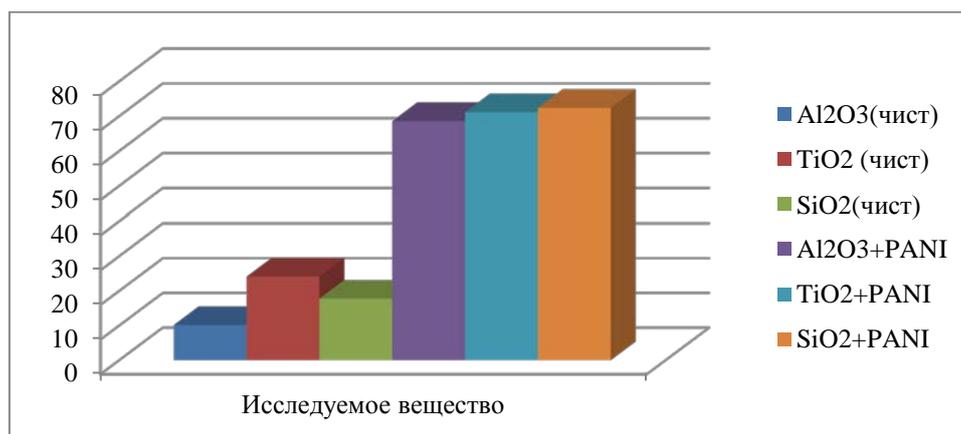


Рис. 9. Результаты определения адсорбционной активности по йоду

Сравнительный анализ адсорбционной активности показал, что наибольшей адсорбционной активностью по йоду обладает сорбент модифицированный силикагель.

Выводы

1. Химический синтез полианилина является простым, быстрым и легко осуществимым на поверхности сорбентов.

2. Определено йодное число для образцов – в случае сорбции йода лучше всего работают модифицированные сорбенты.

3. С помощью метода окситермографии были определены массы осажденного полианилина на поверхности сорбентов. Больше всего

полимера осадилось на поверхности диоксида титана.

Библиографический список

1. Deivanayaki S., Ponnuswamy V. Synthesis and characterization of TiO₂ – doped Polyaniline nanocomposites by chemical oxidation method//Materials Science in Semiconductor Processing. 2013. V. 16. P. 554–559.
2. Liuxue Zhang. Preparation of PANI/TiO₂ nanocomposites and their solid-phase photocatalytic degradation// Polymer Degradation and Stability. 2006. V. 91. P. 2213–2219.
3. Lucia H. Mascaro, Alessandra N. Berton Electrochemical Synthesis of Polyaniline/Poly – O –

Aminophenol Copolymers in Chloride Medium// SAGE-Hindawi Access to Research International Journal of Electrochemistry. 2011. V. 11, № 7. P. 2.

4. Mohammad Reza Nabid. Polyaniline/TiO₂ Nanocomposite: Enzymatic Synthesis and Electrochemical Properties// Int. J. Electrochem. Sci. 2008. V. 3. P. 1117–1126.

5. Zahoor Ahmed. Application of PANI/Al₂O₃ composite towards the removal of tartrazine dye from aqueous solution// Sci.Int. (Lahore). 2015. V. 27 (1). P. 319–323.

6. ГОСТ 6217 – 74. Уголь активный древесный дробленый. Технические условия.

7. Земскова Л.А. Модифицированные углеродные волокна: сорбенты, электродные материалы, катализаторы// Вестник, ДВО РАН. Владивосток, 2009. № 2. С. 31–45.

8. Иванец М.Г., Невар Т.Н., Савицкая Т.А., Гриншпан Д.Д. Морфология поверхности и пористая структура углеродных сорбентов// Журнал «Неорганические материалы». М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр "Наука"». 2011. № 10. С. 1170–1175.

9. Килов А.С., Гречаник С.В. Определение пористости изделий из порошковых материалов. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2008. С. 300–304.

10. Лошин А.А. Новые ионообменники на основе силикагеля, поверхностно-модифицированного поливинилпиридином и полиэтиленимином, для ионохроматографического определения ионов: дисс. М.: МГУ им. Ломоносова, 2016.

11. Новикова Ю.В. Физико-химические закономерности получения осадков и пленок на основе оксида цинка с использованием слабых оснований: дисс. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2015. С. 115–163.

12. Пискунова В.С., Новичков Р.В., Зуев Б.К. Ковалентная и сорбционная иммобилизация органических соединений на кремнеземных микро- и наночастицах и исследование полученных систем методом окситермографии// Международный студенческий научный вестник. 2017. № 5. С. 87–108.

13. Савин А. В. Органомодифицированные сорбенты для удаления легких нефтяных углеводородов из водной и воздушной сред: дисс. Казань: Казанский (Приволжский) гос. ун-т, 2014.

14. Тунакова Ю.А. Оценка сорбционной емкости биополимерных сорбентов на основе альгинатов в отношении металлов// Вестник Казанского технологического университета. Казань, 2010. № 5. С. 57–62.

*Поступила в редакцию
26.05.2018*

ABSTRACTS

Venitsianov E.V. The questions of development of the system of complex monitoring of water objects

The methodology of designing and reconstructing the monitoring system for water bodies is proposed, taking into account modern requirements for the information obtained, necessary for water quality assessment for different types of water use, including drinking water supply; ecological condition of water bodies; development of measures for the protection of water.

Keywords: water objects monitoring, hydrological, hydrochemical, hydrobiological indicators of water quality, design of monitoring, information.

Ivanova A.I., Lazareva G.A., Kuznetsova N.V. Evaluation of the water quality of the Volgusha river in macrophytes

The paper deals with results of Volgusha water quality assessment. The evaluation of pollution intensity was based on saprobiotic analysis by means of pollution indicator organism. Additionally, the work is devoted to aquatic vegetation characteristic, floristic composition of macrophytes and foliage cover.

Keywords: macrophytes, indicator species, saprobity, helophytes, immersed hydrophytes, hydrophytes with floating leaves.

Kazartsev S.V., Egorov V.G. A test-bench for investigation and comparison of different scintillators

A test-bench for investigation and comparison of different scintillators is described. It consists of several photomultipliers, light-tight box for the samples under investigation (including liquid ones), muon telescope, LED, a set of radioactive sources and electronics for data acquisition and analysis. The test-bench allows to measure response function of scintillator samples when irradiated with α -particles, electrons, γ -rays and neutrons of different energy, as well as cosmic muons.

Keywords: scintillator, PMT, quenching-factor, neutrons, response function, muons.

Piskunova V.S., Novichkov R.V., Zuev B.K. Oxythermography as a method of assessment of modification of a nanoparticles surface of silicon dioxide by organic compounds

Functional colloid particles of silicon dioxide play a large role in modern science and different industries. The increase interest of researchers in nanoparticles is by presence at them unique physical and chemical properties. Properties of the described systems depend from structure, structure and density of the imparted layer on surface and the size of particles. The imparted superficial compounds are used as chemical catalysts, biosensors, motionless phases in a chromatography, fillers of polymers, biological and medications more and more widely.

When carrying out process of modification it is necessary to know, how fully there took place modification of a surface. There are several approaches for the analysis of nanoparticles with the imparted superficial structures [3]. In this paper for determination of 3-aminopropyltriethoxysilane the oxythermography was used [4]. Feature oxythermography was that, forming of a thermooxidizing spectrum was performed in an air flow. Change (reduction) of content of oxygen was registered in a air flow which is going out of the high-temperature reactor at programmable oxidation of organic compounds on nanoparticles surfaces. This method has a number of benefits. For example, when using air as the oxidizing environment no account reagents are required, but the analysis does not demand a lot of time.

The purpose of this paper was studying of a possible application of the oxythermography method to apply it in definition of sorption kinetics of 3-aminopropyltriethoxysilane on a nanoparticles surface of silicon dioxide [1].

Nanoparticles of silicon dioxide received by Shtober – Fink – Bon method [6]. The choice as the modifier 3-aminopropyltriethoxysilane is caused by availability of amino groups as a part of his molecule which can easily be protonated, changing a charge of a surface of silicon dioxide.

For selection of modification optimal conditions of a particles surface of SiO_2 the kinetics of this process with use of different methods was investigated: a microelectrophoresis with determination of zeta-potential and oxythermography. The oxythermography method also carried out quantitative assessment of the modifier sorption.

Keywords: nanoparticles, silicon dioxide, 3-aminopropyltriethoxysilane, oxythermography, zeta-potential.

Shukrinov Yu.M., Rahmonov I.R., Rodin K.M. Simulation of the current-voltage characteristic of a ring system of parallel Josephson junctions

Based on the computer simulation of the phase dynamics of the ring system of parallel Josephson junctions, the current-voltage characteristic and the time dependences of the voltage for different values of the bias current are calculated. A detailed description of the procedure for calculating the current-voltage characteristic of the considered system is given. It is shown that on the current-voltage characteristic of the ring system appears an additional branch, which is related to the resonance of the pulsating fluxon and the plasma wave.

Keywords: Josephson effect, Josephson junctions, fluxon, Frenkel – Kontorova model, current-voltage characteristic, zero field steps.

Spiridonova A.B., Savvateeva O.A. EURT: dynamics and forecast

This paper presents an analysis of the environmental consequences of the accident that occurred on September 29, 1957 at IU "Mayak" due to the failure of the cooling system, where within 10–11 hours, radioactive substances fell over 300–350 km in the northeast direction from the place of the explosion, forming the East Urals Radioactive Trace. To date, the concentration of radionuclides in various ecosystems has decreased by hundreds - thousands times, and this process was most rapid in the first five years. Currently, radioactive contamination of the territory in the area of the enterprise is determined mainly by ^{90}Sr , ^{137}Cs and by plutonium, which determines the long-term nature of the radiation exposure. Until now, there remains a need to understand the degree of danger of large areas of polluted territories managing.

The work presents modern data on the processes occurring in the territory. The scientific basis for the assessment of the effect of pollutants on biota is considered and the dynamics of the radioactive environment and the forecast up to 2047 are also studied.

Keywords: EURT, dynamics, forecast, strontium, cesium, radiation, accident, technogenic accident, radioactive pollution.

Timoshenko G.N., Goryacheva Y.A. Radiation risks of occupational chronic exposure to employees of the Production Association "Mayak"

Employees of the Production Association "Mayak" work in radiation-dangerous working conditions and are suffer from chronic external and internal exposure. In this paper, the morbidity and mortality rates of Mayak workers exposed to occupational prolonged irradiation are estimated, depending on the radiation and nonradiation factors.

Keywords: radiation risk; chronic exposure; morbidity; personnel; Production Association "Mayak".

Fadeikina I.N., Ogurtsova A.V. Surface modification of the sorbent conductive polymers for example polyaniline

In the present article discusses the possibility of modification by polyaniline of a number of sorbents and the study of their physico-chemical characteristics. Studied methods of chemical synthesis of polyaniline on the surface selected for studies of sorbents (silica gel, Al_2O_3 , TiO_2), the basic sorption characteristics of the obtained modified materials for the improvement/ deterioration of the sorption properties by means of studies on an IR spectrometer by the method of oxycarbonate, determination of adsorption activity of the sorbent iodine, heavy metals, petroleum products, as well as using optical microscopy.

Keywords: semiconductor materials, polyaniline, polymers, silica gel, Al_2O_3 , TiO_2 , sorbents.

**Порядок публикации статей в журнале
«Вестник Международного университета природы, общества и человека Дубна»**

Журнал издаётся с ноября 1996 года, является изданием университета «Дубна».

Основные рубрики, по которым принимаются оригинальные, актуальные, не публиковавшиеся ранее материалы:

- Естественные и технические науки.
- Экономика и управление.
- Социальные и гуманитарные науки.
- Информационные науки.
- Педагогика.

Осуществляется обязательная рассылка журнала в Книжную палату РФ, библиотеки других вузов страны, Московской области и города Дубна, авторам и др.

Содержание журналов с 2005 года представлено на сайте университета «Дубна».

К сотрудничеству приглашаются специалисты и исследователи в указанных областях, докторанты, аспиранты, преподаватели вуза.

Для публикации статьи необходимо представить в редакцию журнала:

— **материал** в электронном и печатном виде (текст в MS Word, рисунки в виде графических файлов — согласно Правилам оформления рукописей, действующим в университете «Дубна»), объёмом до 10 печатных страниц формата А4;

— оформленный бланк **«Передача авторского права и декларация об обязанности»** (см. приложение);

— **рецензию на статью** (одну внешнюю либо две внутренние);

— **индекс УДК** к статье;

— **аннотацию** к статье на русском и английском языках,

— **перевод на английский язык** названия статьи и фамилии, имени, отчества авторов;

— **ключевые слова** к статье — 5—6 слов или словосочетаний на русском и английском языках;

— **сведения об авторе(ах)** — полностью фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание, место работы и должность; координаты: рабочий, мобильный телефон, адрес электронной почты;

— **престатейный «Библиографический список»** — не менее пяти наименований.

Редакция может публиковать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точки зрения авторов. Авторы опубликованных статей несут ответственность за точность приведённых фактов, статистических данных, собственных имён и прочих сведений, а также за содержание материалов, не подлежащих открытой публикации.

Адрес редакции

141982, г. Дубна Московская обл.,

ул. Университетская, 19

Тел.: (+7 49621)6-60-89, 1355

E-mail: izdat@uni-dubna.ru