

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 504.064.3

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ СОРБЕНТОВ  
НА ОСНОВЕ ГЕКСАЦИАНОФЕРАТОВ ДЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ  
РАДИОЦЕЗИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАДИОЛОГИЧЕСКОГО  
МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ ВОД****<sup>1</sup>Епифанов А.О., <sup>2</sup>Епифанова И.Э.**<sup>1</sup>*ФГБУ Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета РФ,  
Обнинск, e-mail: epifanov@rpatyphoon.ru;*<sup>2</sup>*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»,  
Обнинск, e-mail: epifan.obninsk@gmail.com*

Представлен обзор гексацианоферратных сорбентов, используемых в современной методике определения содержания радионуклидов в природных водах для концентрирования <sup>137</sup>Cs из проб воды с последующим гамма-спектрометрическим измерением. Приведены результаты многолетнего опыта проведения радиологического мониторинга морских и пресных вод с применением гексацианоферратного сорбента переходных металлов Мтилон сотрудниками НПО «Тайфун». Сообщается о результатах исследований в области разработки и создания новых гексацианоферратных сорбентов переходных металлов на основе различных носителей с использованием в качестве основы-матрицы некоторых видов морских водорослей и хитозана. Показаны возможность и целесообразность использования отходов пищевой и обрабатывающей промышленности (ксилема злаковых растений, лузга, древесные опилки мелкой фракции и хвоя) для создания матриц-носителей гексаноферратных сорбентов. Отмечено, что из-за отсутствия в настоящее время сорбента, обладающего одновременно высокой сорбционной способностью к ионами цезия, прочностью фиксации гексацианоферратов в матрице и в то же время низкой стоимостью производства и возможностью использования в процессе изготовления такого сорбента отходов промышленного производства, проведение дальнейших исследований в области разработки и изготовления гексацианоферратных сорбентов, используемых при проведении радиологического мониторинга природных вод, сохраняют свою актуальность.

**Ключевые слова:** радиоцезий, гексацианоферрат, композитный сорбент, избирательная сорбция, мониторинг природных вод, гамма-спектрометрия

**APPLICATION OF COMPOSITE HEXACYANOFERRATE SORBENTS  
FOR RADIOCESIUM CONCENTRATION DURING CARRIED  
OUT OF NATURAL WATERS RADIOLOGICAL MONITORING****<sup>1</sup>Epifanov A.O., <sup>2</sup>Epifanova I.E.**<sup>1</sup>*Research&Production Association «Typhoon» of Roshydromet RF, Obninsk,  
e-mail: epifanov@rpatyphoon.ru;*<sup>2</sup>*Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, e-mail: epifan.obninsk@gmail.com*

A review of hexacyanoferrate sorbents applied for concentration <sup>137</sup>Cs from water samples for measuring activity of radiocesium in natural waters for subsequent gamma-spectrometry measurements is presented. The information about many years of scientific studies carried out by RPA «Typhoon» scientists on marine and freshwater radiological monitoring using hexacyanoferrate sorbent of transition metals on Mtilon matrix is described. The research findings on the problem of creating and development of new representatives of transition metals hexacyanoferrate sorbents on different carriers by using some kinds of species of marine algae and chitosan as matrix-base is given. Approachment and feasibility to use agro-food and wood industrial waste (cereals xylem, husk, fine sized wood powder and needle) for fabrication hexacyanoferrate sorbents matrix-carries was showed. It is be noted that continuation study on the problem of creating and development of new hexacyanoferrate sorbents for using in marine and freshwater radiological monitoring continues to be relevant because at the present time there is no sorbents with such characteristics as the high sorption capacity for cesium ions, the strenght fixation of hexacyanoferrate in a matrix-base, and in the same time with low cost of manufacturing and with possibility to use industrial waste to fabrication this sorbent.

**Keywords:** radiocesium, hexacyanoferrate, composite sorbent, selective sorption, environmental water's monitoring, gamma-spectrometry

В результате увеличения техногенной нагрузки на окружающую среду возрастает загрязненность пресных и морских вод радионуклидами. К наиболее значимым из них относится <sup>137</sup>Cs, имеющий длительный период полураспада (около 30 лет), высокую радиотоксичность (β- и γ-излучатель) и повышенную растворимость в водных

средах. Являясь токсикантом, легко встраиваемым в процессы метаболизма, этот радионуклид своим присутствием в окружающей среде создает угрозу безопасности здоровья людей. Поэтому контроль содержания радиоцезия в природных водах является одной из важнейших задач радиологического мониторинга окружающей среды.

Необходимо отметить, что все измерительные приборы, используемые при оценке радиологического состояния водных объектов, имеют ограничения по уровню минимально детектируемой активности. Поэтому результаты измерений на нижнем пороге обнаружения имеют высокую погрешность. Для обеспечения контроля норм радиационной безопасности с наименьшими погрешностями применяется метод концентрирования радионуклидов – один из современных методов, позволяющий значительно понизить нижний предел определения радиационного параметра [1]. Данная работа представлена с целью ознакомления специалистов, работающих в области контроля экологического состояния окружающей среды и, в частности, радиологического состояния природных вод, с имеющимся в настоящее время опытом работ по предварительному концентрированию радиоцезия из проб воды на гексацианоферратных сорбентах.

*Концентрирование радиоцезия с помощью гексацианоферратных сорбентов переходных металлов*

В настоящее время для извлечения радионуклидов из растворов используются физико-химические методы, основанные на сорбционных, осадительных и мембранных процессах [2]. Сорбционные методы являются наиболее эффективными для извлечения долгоживущих радионуклидов из загрязненных природных вод [3]. Ионообменные сорбенты (иониты) представляют собой неорганические или полимерные органические соединения, содержащие в своей структуре ионогенные группы, способные к обмену ионов. В зависимости от характера ионогенных групп ионообменные сорбенты разделяются на катионо- и анионообменные. Сильнокислотные катионообменные сорбенты, содержащие сульфогруппы КУ-2 и сильноосновные анионообменные АВ-17, входят в ряд наиболее часто применяемых в практике ионитов отечественного производства. К недостаткам таких сорбентов относится их низкая селективность по отношению к радионуклидам  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

При проведении мониторинга морских и пресных вод наиболее распространенной и десятилетиями применяемой является методика концентрирования радиоцезия с использованием смешанных гексацианоферратных сорбентов (ГЦФС) переходных металлов, обладающих высокой селективностью к ионам цезия и рубидия [4–6].

При испытании сорбента из ионообменной смолы, в поры которой внедрили

гексацианоферрат меди, для концентрирования радиоцезия из воды, установлено, что коэффициент улавливания цезия в экспериментальных условиях составляет 0,4–0,5 при скорости пропускания воды через колонку 3 л/мин [7]. При испытаниях такого сорбента в Норвежском море коэффициент улавливания цезия был ниже (0,14–0,25). Установлен факт переноса  $^{134}\text{Cs}$ , являющегося маркером радиоактивных отходов заводов по переработке отработавшего ядерного топлива в Селлафилде (Sellafield, Windscale), вдоль всего западного побережья Скандинавского полуострова. Не отмечено насыщения сорбента после пропускания через него нескольких тысяч литров морской воды [7]. Сорбенты российского производства КУ-2 и АВ-17, импрегнированные гексацианоферратом меди, широко использовались в начальный период после аварии на Чернобыльской АЭС при определении уровней загрязнения радионуклидами цезия рек Днепр и Десна, которые использовались для водоснабжения Киева. Коэффициент улавливания сорбентов на основе импрегнированных смол составлял около 80%. Поэтому позднее при проведении радиологического мониторинга рек Днепр и Десна на замену сорбентам на основе ионитов был принят к использованию сорбент АНФЕЖ, обеспечивающий более высокий уровень извлечения цезия из проб воды и поставляющийся в готовом для применения виде.

*Сорбент АНФЕЖ: свойства и применение при радиологическом мониторинге*

Целлюлозно-неорганический сорбент АНФЕЖ, разработанный по результатам исследований сотрудников Уральского научно-исследовательского химического института, получают путём внедрения гексацианоферратов калия и железа в гранулы древесной целлюлозы [8]. С начала 1980-х гг. АНФЕЖ широко используется при радиационном мониторинге морских и пресных вод. Концентрирование радиоцезия из морской воды с помощью этого сорбента проводилось в 1979 г. в районе Кольского залива, в 1980 г. – в Охотском море. Разработанная методика экспрессного определения радионуклидов цезия в морской воде была использована для определения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в пробах морской воды из районов Берингова моря и Тихого океана. ГЦФС АНФЕЖ в настоящее время производит НПП «Экосорб». АНФЕЖ имеет высокую эффективность сорбции (95–98%) и хорошие кинетические характеристики при высоком расходе воды (до 100 мл/мин×см<sup>2</sup>) в сорбционной колон-

не. Он легко гомогенизуется, для гамма-анализа этот сорбент можно использовать как в озолённом виде, так и без озоления. Сорбент дешев, не требует длительной подготовки перед использованием, легок в эксплуатации и удобен для работы в экспедиционных условиях [9].

Методика определения радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в природных водных средах, использующая композиционный неорганический ионообменный материал АНФЕЖ, обладает эффективностью не менее 98% и имеет длительный опыт применения в России, Украине, Беларуси, Японии, США и ряде других стран [10]. АНФЕЖ использовался при проведении мониторинга загрязнения морских вод вблизи Японии, образованного в результате сброса радиоактивных отходов предприятием, регенерирующим ядерное топливо [11]. Описание экспресс-методики анализа природных вод с пределом обнаружения определяемой активности порядка 1 Бк/м<sup>3</sup> и возможностей приборного комплекса на основе сорбента АНФЕЖ и портативного спектрометра СКС-99 «Спутник» при исследовании состава поверхностных вод в полевых условиях приведено в работе [10].

Недостатком сорбента является недостаточно прочная фиксация ферроцианида в матрице, что проявляется при пропускании через АНФЕЖ больших объёмов (свыше 500 л) воды – происходит обесцвечивание сорбента, т.е. гексацианоферрат железа вымывается из лигноцеллюлозной матрицы. Следствием этого процесса становится потеря части  $^{137}\text{Cs}$ . Отмеченным недостатком данного сорбента объясняется различие в оценке содержания  $^{137}\text{Cs}$  в воде Баренцева моря, приведенной в [4] (содержание  $^{137}\text{Cs}$ , концентрированного из объёма 240 л, определено в два раза выше, чем при концентрировании из объёма 1000 л). Кроме того, к недостаткам АНФЕЖа можно отнести наличие в сорбенте мелкой фракции, которая также может привести к потерям активности и усложняет работу с сорбентом [12].

*Волокнистые сорбенты ФИБАН и Мтилон. Радиологические исследования, проведенные с использованием сорбента Мтилон*

Специалистами Института физико-органической химии Республики Беларусь разработан волокнистый ионит – сорбент ФИБАН на основе химически стойких синтетических волокон. Модификации этого сорбента рекомендованы к использованию при проведении анализов природной воды на содержание  $^{137}\text{Cs}$ . Отмечено, что модифицированный ферроцианидами металлов сорбент ФИБАН К-1-1 обладает уникаль-

ной селективностью и сорбционной емкостью по отношению к радионуклидам цезия (степень извлечения – 95%). При высокой скорости сорбционного процесса и низком сопротивлении фильтрующего слоя сорбента потокам жидкости недостатком данного сорбента является требование предварительной очистки исследуемой воды. Необходима установка предварительного фильтра, удаляющего возможные механические и биологические примеси [13, 14].

При проведении радиологического мониторинга природных вод сотрудниками НПО «Тайфун» длительное время применялся сорбент на основе комплекса «Мтилон-Т», разработанный в Московском текстильном институте им. Косыгина [15]. Наличие ионогенных групп в этих волокнистых материалах позволило получить сорбент, в котором гексацианоферратный комплекс прочно связан с волокнистой матрицей и не вымывается из неё при пропускании через сорбент больших объёмов воды. Мониторинг радиоактивного загрязнения арктических морей, проведенный с использованием ГЦФС на основе волокна «Мтилон-Т», показал, что основной вклад в загрязнение Белого, Баренцева и Карского морей даёт  $^{137}\text{Cs}$  от сбросов западноевропейских промышленных предприятий [16]. Информация о содержании  $^{137}\text{Cs}$  в акваториях, прилегающих к контролируемым территориям, а также вывод об отсутствии отрицательного влияния на окружающую среду радиационно опасных объектов, расположенных на территориях Архангельской, Мурманской, Камчатской областей и Приморском крае, сделан на основе регулярных комплексных радиологических обследований, проводимых под методическим руководством НПО «Тайфун» [17]. Результаты определения уровня содержания радионуклидов цезия в водах Северного Ледовитого океана при низкой концентрации загрязнителя приведены в [18]. Установлено, что в водах Северного Ледовитого океана  $^{137}\text{Cs}$  практически полностью находится в растворённом состоянии – аналогичный вывод сделан зарубежными специалистами при анализе проб морской воды в Норвежском море [7]. Отмечено, что применяемая в НПО «Тайфун» методика отбора проб большого объёма с применением погружного электронасоса, 10-секционной фильтрующей установки, держателя сорбента и счётчика объёма пропущенной воды позволяет в процессе отбора отделять взвеси, чтобы измерять активность взвеси [19]. Данные мониторинга морских вод, проведенного после аварии на АЭС Фукусима, у берегов

Японии и в северо-западной части Тихого океана, приведены в исследовании [20].

На основании информации, полученной при проведении радиоэкологического мониторинга рек Тобол и Иртыш, по которым происходит перенос радиоактивных отходов ПО «Маяк», сделан вывод о незначительном, на уровне фоновых значений, содержании радиоцезия в водах изучаемого участка речной системы Теча – Исеть – Тобол – Иртыш – Обь [21]. При исследовании содержания радиоцезия в пресных водах (р. Енисей, Ангара, Подкаменная Тунгуска) сотрудниками НПО «Тайфун» было установлено, что валовая объёмная активность  $^{137}\text{Cs}$ , обусловленная глобальным загрязнением, в исследуемых водах составляла 0,20–0,30 Бк/м<sup>3</sup>, а доля этого радионуклида, фиксированная на взвеси, изменялась от 48 до 20 % [22, 23].

Многолетняя практика использования специалистами НПО «Тайфун» ГЦФС на основе волокна «Мтилон-Т» для концентрирования радиоцезия показала устойчивость связи активной составляющей сорбента с волокнистой матрицей и удобство работы с данным сорбентом в экспедиционных условиях. Даже при пропускании через сорбент больших (до 10 м<sup>3</sup>) объёмов воды волокно «Мтилон-Т» не набухает в воде и гидравлическое сопротивление сорбента не возрастает в процессе отбора проб. Несмотря на отмеченные достоинства, ГЦФС на основе волокна «Мтилон-Т» в настоящее время широко не используется, так как не производится в промышленных масштабах.

#### *Опыт создания биосорбентов на основе водорослей и хитозана*

Для снижения стоимости и улучшения эксплуатационных характеристик целлюлозно-неорганических сорбентов создаются и испытываются сорбенты на основе различных матриц. Опыт работ по созданию эффективных композиционных сорбентов, при котором в качестве основы (матрицы) ГЦФС использовались различные водоросли, описан зарубежными [24–25] и отечественными специалистами. О результатах разработки сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из водных объектов, выполненных в Пермском национальном исследовательском политехническом университете, сообщается в [26–28]. Описано получение нового сорбента на основе морских водорослей вида *Cystoseira barbata* и ферроцианидов переходных металлов для извлечения цезия из воды [26]. Результаты изучения составов и сорбционных свойств сорбентов, полученных путем модифицирования поверхности морских

водорослей ферроцианидами железа-калия и цинка-калия, представлены в [27]. Изучение состава, структуры и свойств композиционных сорбентов, включающих неорганический компонент (гексацианоферрат) и органический – водоросль *Cystoseira barbata*, приведено в работе [28].

Возможность иммобилизации неорганических селективных ионообменников – ферроцианидов переходных металлов (Ni, Zn, Cu) – в хитозановую матрицу исследуется в Институте химии ДВО РАН. Сорбент на основе ферроцианидов Ni-K обладает высокой селективностью к радионуклиду  $^{137}\text{Cs}$ , химической и механической устойчивостью и может быть использован в цикле сорбция – регенерация для определения содержания в морской воде антропогенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  при проведении радиоэкологического мониторинга. Волокнистая модификация органоминерального сорбента на основе ферроцианида Zn-K может использоваться как набивка для фильтрующих элементов при экспрессном концентрировании  $^{137}\text{Cs}$  из морской воды. В 2016 г. на НИС «Академик Трёшников» волокнистый сорбент испытывался для предварительного концентрирования  $^{137}\text{Cs}$  из вод Атлантического океана [29–31].

В работе [32] сообщается о синтезировании композитного сорбента на основе сферогранулированного хитозана, модифицированного смешанным ферроцианидом, имеющего высокую эффективность по отношению к  $^{137}\text{Cs}$ . Рассмотрена возможность использования такого сорбента при мониторинге морских акваторий. Результаты изучения сорбционных свойств хитозанов по отношению к наиболее экологически значимым радионуклидам и получение композитных сорбентов на его основе, выполненные специалистами РИЦ «Курчатовский институт», могут стать основой для создания технологии выделения и концентрирования радионуклидов из природных и техногенных сред. Разработанные методики определения общего содержания изотопов плутония и цезия в морской воде прошли успешные испытания в экспедиционных условиях при радиоэкологическом мониторинге Карского и Баренцева морей [33]. Надо отметить, что биосорбенты на основе хитинсодержащего сырья находят более широкое применение при решении проблем в медицине или задачах очистки природных вод от токсикантов (по причине обладания хитозана такими уникальными особенностями, как биodeградируемость, отсутствие цитотоксичности, биосовместимость), чем как сорбенты для проведения гамма-спектрометрического анализа.

*Возможность использования недровесного растительного сырья и отходов производства при разработке сорбентов*

В соответствии с общемировой тенденцией к росту производства волокнистых материалов из недровесного растительного сырья (в отличие от традиционного целлюлозного-бумажного производства, при котором используются преимущественно хвойные породы древесины), исследования по разработке и созданию новых недорогих сорбентов радионуклидов из возобновляемого растительного сырья становятся актуальной и практически значимой задачей в области создания современных сорбционных материалов [34, 35]. О разработке сорбентов на основе лигноцеллюлозных материалов, полученных на основе стеблей (ксилемы) однолетних злаковых растений: пшеницы, ржи и овса, сообщается в [36, 37]. Отмечено, что для растений семейства злаковых способность к накоплению радионуклидов является самой высокой по сравнению с другими растениями. Сделан вывод о перспективности использования сравнительно дешевых сорбентов с прочной локализацией радионуклидов на основе отходов растительного происхождения [36].

В качестве сырья для получения новых, дешёвых и эффективных сорбентов в [38] предлагается использовать твёрдые отходы пищевой и обрабатывающей промышленности (овсяная, гречишная, подсолнечная, рисовая лузга и др.). Запасы этих отходов постоянно пополняются. В НПО «Тайфун» разработаны и испытаны образцы ГЦФС, матрицей которых служит лузга подсолнечника. Способ получения таких сорбентов и результаты исследования их сорбционной способности описаны в [12]. Сделан вывод, что, несмотря на более низкие коэффициенты извлечения цезия ГЦФС с матрицей из лузги подсолнечника по сравнению с сорбентом на основе волокна «Мтилон-Т», модификацию сорбента, обработанного  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , можно рекомендовать к применению при контроле загрязнения водных объектов радиоцезием благодаря его доступности, низкой стоимости и удобства в эксплуатации.

Углеродсодержащие отходы (древесные опилки мелкой фракции и хвоя) также являются доступным и дешевым сырьем для производства пористых материалов-сорбентов. В Санкт-Петербургском техническом университете разработаны и созданы новые ионообменные материалы – сульфокатиониты на основе отходов и побочных продуктов деревообрабатывающей промышленности. Проведены исследования их

сорбционных характеристик. Показана возможность использования полученных сульфокатионитов в качестве ионообменных материалов в процессе поглощения радионуклидов наравне с известными марками катионообменников СМ-1 и КУ-2-8 [39].

*Методы оценки содержания  $^{137}\text{Cs}$  в морской воде по собственному  $\beta$ -излучению*

При выполнении комплекса работ в процессе проведения мониторинга загрязнения природных вод наиболее общепринятым и перспективным способом определения содержания радиоцезия в воде, допускающим относительно большой объем препарата и обладающим относительно высокой чувствительностью при использовании отечественной аппаратуры, является метод гамма-спектрометрии [4]. Альтернативная возможность измерения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в морской воде по собственному  $\beta$ -излучению после предварительной сорбции на целлюлозном волокне, импрегнированном ферроцианидом меди (II), исследована авторами [40]. Результатом проведенных исследований стал запатентованный способ измерения концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в водной среде, предназначенный для мониторинга радиоактивного загрязнения водоемов. В заявленном способе содержание  $^{137}\text{Cs}$  определяют методом прямой бета-радиометрии после его концентрирования на дисковых мини-адсорберах. Считаем необходимым заметить, что при проведении экологического мониторинга природных вод в большинстве измерительных лабораторий используются Ge-детекторы с высокой относительной эффективностью регистрации излучения. Поэтому методы измерения  $^{137}\text{Cs}$  по его бета-излучению не имеют, на наш взгляд, преимуществ перед традиционным методом гамма-спектрометрии.

### Заключение

При проведении радиоэкологического мониторинга природных вод особенностью определения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в водных объектах является необходимость концентрирования этого радионуклида из больших объемов воды по причине его низкой концентрации в изучаемых объектах. Для удобства работы сорбенты, используемые при проведении концентрирования, должны обладать следующими качествами:

- высокая сорбционная способность к ионам цезия;
- прочная фиксация сорбента в основе матрицы для обеспечения возможности обработки проб воды больших объемов;

– оптимальное соотношение стоимости производства сорбента при высокой эффективности сорбции.

Дополнительным преимуществом такого сорбента была бы возможность использования в качестве его матрицы-основы отходов промышленного производства или возобновляемого растительного сырья. Среди применяемых на практике в настоящее время сорбентов не существует ни одного, одновременно обладающего всеми вышеперечисленными качествами. Поэтому разработка высокоселективных сорбентов с низкой себестоимостью изготовления, удобных для применения в экспедиционных условиях, для концентрирования радиоцезия при проведении радиологического мониторинга природных вод остается актуальной задачей контроля радиоэкологической безопасности окружающей среды.

### Список литературы

1. Уголев И.И., Аншаков О.М., Матвейчук С.В., Шункевич А.А. Пробоподготовка и концентрирование радионуклидов цезия и стронция для радиометрии // International Nuclear Information System (INIS) Collection, IAEA [Электронный ресурс]. URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/30/060/30060454.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/060/30060454.pdf) (дата обращения: 17.10.2018).
2. Милотин В.В., Везенцев А.И., Соколовский П.В., Некрасова Н.А. Сорбция радионуклидов цезия из водных растворов на природных и модифицированных глинах // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. № 5. С. 879–883.
3. Юрченко В.В., Свиридов А.В., Никифоров А.Ф., Кутергин А.С., Воронина А.В. Концентрирование цезия и стронция из водных систем адсорбентами на основе бентонитовых глин // Бултеровские сообщения. 2016. Т. 47. № 7. С. 52–56.
4. Ремез В.П., Зеленин В.И., Смирнов А.Л., Распопин С.П., Матери А.И., Моржерин Ю.Ю. Целлюлозно-неорганические сорбенты в радиохимическом анализе. III. Концентрирование радиоцезия сорбентом АНФЕЖ // Сорбционные и хроматографические процессы. 2009. Т. 9. № 6. С. 783–788.
5. Remez V.P., Sapozhnikov Yu.A. The Rapid Determination of Cesium Radionuclides in Water System Using Composite Sorbents. Applied Radiation and Isotopes. 1996. vol. 47. no 9–10. P. 885–886.
6. Yasutaka T., Tsuji H., Kondo Y., Suzuki Y, Takahashi A, Kawamoto T. Rapid quantification of radiocesium dissolved in water by using nonwoven fabric cartridge filters impregnated with potassium zinc ferrocyanide. Journal of Nuclear Science and Technology. 2015. vol. 52. no 6. P.792–800.
7. Mann D.R., Casso S.A. In situ chemisorption of radiocesium from seawater. Marine Chemistry. 1984. vol. 14. no 4. P. 307–318.
8. Ремез В.П., Зеленин В.И., Смирнов А.Л., Распопин С.П., Матери А.И., Моржерин Ю.Ю. Целлюлозно-неорганические сорбенты в радиохимическом анализе. II. Синтез и свойства сорбента АНФЕЖ // Сорбционные и хроматографические процессы. 2009. Т. 9. № 5. С. 739–744.
9. Scientific Production Enterprise Eksorb Ltd [Электронный ресурс]. URL: <http://www.eksorb.com/technologies/sorbenty-dlya-analiza/sistem-anfezh> (дата обращения: 18.10.2018).
10. Лисовских В.Г., Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В. Применение неорганических сорбентов для концентрирования цезия-137 из природных вод // Вестник ГУ «Научный центр безопасности жизнедеятельности детей». 2012. № 1(11). С. 105–107.
11. Nakanishi T., Aono T., Yamada M., Kusakabe M. Temporal and spatial variations of <sup>137</sup>Cs in the waters off a nuclear fuel reprocessing facility in Rokkasho, Aomori, Japan. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2010. vol. 283. no 3. P. 831–838.
12. Тертышник Э.Г., Уваров А.Д., Епифанов А.О. Использование композитных сорбентов на основе гексацаноферратов переходных металлов, внедрённых в лугзу подсолнечника, для извлечения радиоцезия из природных вод // АНРИ. 2014. № 4 (79). С. 65–72.
13. Поликарпов А.П., Шункевич А.А. Волокнистые иониты ФИБАН, получение и применение. Репозиторий Белорусского национального технического университета. С. 82–84. [Электронный ресурс] URL: [https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/41130/Voloknistye\\_ionity\\_FIBAN\\_poluchenie\\_i\\_primenenie.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/41130/Voloknistye_ionity_FIBAN_poluchenie_i_primenenie.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (дата обращения: 18.10.2018).
14. Института физико-органической химии Республики Беларусь. ФИБАН [Электронный ресурс]. URL: [http://ifoch.bas-net.by/research/fiban/K\\_1\\_1.html](http://ifoch.bas-net.by/research/fiban/K_1_1.html) (дата обращения: 18.10.2018).
15. Лишевская М.О. Синтез производных целлюлозы, содержащих сульфгидрильные и тиамидные группы: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1966. 123 с.
16. Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичёв В.Б. Загрязнение Белого моря радиоактивными отходами западноевропейских стран // Атомная энергия. 1988. Т. 65. № 1. С. 66–67.
17. Вакуловский С.М., Прописнова М.В., Ким В.М., Никитин А.И., Катрич И.Ю., Чумичёв В.Б., Волокитин А.А. Комплексное радиоэкологическое обследование территорий и прилегающих акваторий вблизи пунктов базирования и утилизации атомных подводных лодок // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2008. № 4. С. 51–56.
18. Никитин А.И., Катрич И.Ю., Кабанов А.И., Чумичёв В.Б., Смагин В.М. Радиоактивное загрязнение Северного Ледовитого океана по результатам наблюдения в 1985–1987 гг. // Атомная энергия. 1991. Т. 71. № 2. С. 169–172.
19. Методические рекомендации по определению радиоактивного загрязнения водных объектов / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Гидрометеоздаг, 1986. 78 с.
20. Ramsaev V., Bruk G., Ivanov S., Nikitin A., Artemiev G., Sevastyanov A. Shipboard Determination of Radiocesium in Seawater after the Fukushima Accident: results from the 2011–2012 Russian Expedition to the Sea of Japan and Western North Pacific Ocean. Journal of Environmental Radioactivity. 2014. vol. 135. P. 13–24.
21. Nikitin A.I., Chumichev V.B., Valetova N.K., Katrich I.Yu., Kabanov A.I., Dunaev G.E., Shkuro V.N., Rodin V.M., Mironenko A.N., Kireeva E.V. The Current Content of Artificial Radionuclides in the Water of the Tobol Irtysh River System (from the Mouth of the Iset River to the Confluence with the Ob River). Journal of Environmental Radioactivity. 2007. vol. 96. no 1–3. P. 138–143.
22. Бочков Л.П., Вакуловский С.М., Никитин А.И., Тертышник Э.Г., Чумичёв В.Б. О содержании цезия-137 в поверхностных водах суши // Метеорология и гидрология. 1983. № 8. С. 79–83.
23. Тертышник Э.Г. Загрязнение радионуклидами р. Енисей в 1972–2001 гг.: дис. ... канд. геогр. наук. Обнинск, 2007. 147 с.
24. Jalali-Rad R., Ghafourian H., Asef Y., Dalir S.T., Sahafipour M.H., Gharanjik B.M. Biosorption of cesium by native and chemically modified biomass of marine algae: introduce the new biosorbents for biotechnology applications. Journal of Hazardous Materials. 2004. vol. 116. no 1–2. P. 125–134.
25. Dabbagh R., Ebrahimi M., Afaki F., Ghafourian H., Sahafipour M.H. Biosorption of stable cesium by chemically modified biomass of Sargassum glaucesens and Cytoseira indica

in continuous flow system. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. vol. 159. no 2–3. P. 354–357.

26. Пан Л.С., Рожина Д.А. Получение и изучение сорбционных свойств композиционного сорбента на основе ферроцианида железа и биполимерной основы // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биология*. 2013. № 1. С. 168–178.

27. Рожина Д.А., Пан Л.С., Маковеев А.С. Ионообменные свойства биосорбентов на основе морских водорослей и ферроцианидов железа и цинка, селективных к ионам цезия // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2014. Т. 19. № 5. С. 1458–1461.

28. Вольхин В.В., Пан Л.С., Балабенко Е.А., Бахирева О.И., Леонтьева Г.В., Ходяшев Н.Б. Синтез и свойства композиционных сорбентов на основе смешанных гексацианоферратов (II) меди, цинка-калия и биполимерной матрицы // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2012. № 4. С. 20–26.

29. Egorin A., Tokar E., Zemskova L. Chitosan-ferrocyanide sorbent for Cs-137 removal from mineralized alkaline media. *Radiochimica Acta*. 2016. vol. 104. no 9. P. 657–661.

30. Егорин А.М., Токарь Э.А., Тананаев И.Г., Земскова Л.А. Извлечение цезия-137 из высокоминерализованных растворов композитными ферроцианидными сорбентами // V Международная конф.-школа по химической технологии ХТ'16: сборник тезисов докладов сателлитной конференции XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. В 3 т. (Волгоград, 16–20 мая 2016 г.). Волгоград: Издательство ВолГТУ, 2016. Т. 2. С. 385–387.

31. Егорин А.М., Токарь Э.А., Авраменко В.А., Тананаев И.Г., Земскова Л.А. Органоминеральный сорбент на основе смешанного ферроцианида цинка-калия для извлечения и концентрирования радионуклида Cs-137 из морской воды // *Седьмая Российская школа по радиохимии и ядерным технологиям: сб. тезисов докладов (Озерск, 12–16 сентября 2016 г.)*. Озерск: Издательство РИЦ ВРБ ФГУП «ПО Маяк», 2016. С. 118–162.

32. Румянцева Е.В., Велешко А.Н., Кулюхин С.А., Велешко И.Е., Шайтура Д.С., Розанов К.В., Дмитриева Н.А.

Получение и свойства модифицированного сферогранулированного хитозана для сорбции  $^{137}\text{Cs}$  из растворов // *Радиохимия*. 2009. № 5. С. 434–438.

33. Велешко А.Н., Велешко И.Е., Румянцева Е.В., Дмитриева Н.А. Хитозан – перспективный материал для выделения и концентрирования радионуклидов из природных и техногенных сред // *Экологические системы и приборы*. 2013. № 11. С. 8–15.

34. Кочева Л.С. Структурная организация и свойства лигнина и целлюлозы травянистых растений семейства злаковых: автореф. дис. ... докт. хим. наук. Архангельск, 2008. 43 с.

35. Броварова О.В., Кочева Л.С., Карманов А.П. Сорбенты радионуклидов на основе лигноцеллюлозных материалов // *Февральские чтения*. 2011. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_25302667\\_59513680.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_25302667_59513680.pdf) (дата обращения: 18.10.2018).

36. Броварова О.В. Сорбенты растительного происхождения // Юбилейные Февральские чтения: материалы научно-практической конференции Сыктывкарского лесного института по итогам НИР в 2011 г. (Сыктывкар, 20–22 февраля 2012 г.). Сыктывкар: Изд-во Сыктывкарского лесного института, 2012. С. 513–521.

37. Кочева Л.С., Карманов А.П., Шуктомова И.И., Рачкова Н.Г., Котова О.Б. Характеристика лигноцеллюлозных материалов как сорбентов радионуклидов // *Бутлеровские сообщения*. 2015. Т. 44. № 11. С. 91–96.

38. Шмандий В.М., Безденежных Л.А., Харламова Е.В. Использование адсорбентов, полученных из отходов, для улучшения состояния среды обитания человека // *Гигиена и санитария*. 2012. № 6. С. 44–45.

39. Далидович В.В., Григорьева Л.В. Сульфокатиониты на основе побочных продуктов и отходов деревообрабатывающей промышленности и лесопромышленного комплекса // *Известия СпбГТИ (ТУ)*. 2016. № 33. С. 81–83.

40. Бей О.Н., Проскурин В.Ю., Гулин С.Б. Измерение концентрации  $^{137}\text{Cs}$  по собственному  $\beta$ -излучению с помощью жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии // *Радиохимия*. 2016. Т. 58. № 2. С. 147–149.