

УДК [613.3+614.777]:539.16

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ РАДИОНУКЛИДОВ И ПОВЫШЕНИЯ ЕЁ БИОТРОПНОСТИ

© 2016 г. ¹И. Г. Мосягин, ²Е. Я. Бузов, ²А. И. Громов, ³В. Г. Кузнецов, ⁴В. И. Касаткин,
⁴А. В. Куликов, ²В. П. Пониматкин, ⁵Л. А. Рыбина

¹Главное командование Военно-морского флота России; ²Медико-биологический научно-исследовательский центр «Дискретная нейродинамика»; ³Институт проблем машиноведения РАН; ⁴НИИ КиВ ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова»; ⁵Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, г. Санкт-Петербург

Обсуждаются результаты исследования сорбционных свойств новых фильтрующих материалов типа CARBOVER – ПСУМ, полученных на основе использования предложенной нанотехнологии. Оценка сорбционных характеристик фильтрующих составов проведена для основных гигиенически значимых природных радионуклидов, содержащихся в пресной воде (²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, ²³⁸U). Установлена эффективность использованной нанотехнологии, обеспечивающей плазменную стимуляцию углеродных материалов для создания сорбентов – композитов с заранее заданными свойствами. Суть данной технологии заключается в разложении углеводородов под действием низкотемпературной плазмы. В качестве низкотемпературной плазмы используется плазма вакуумно-дугового разряда, горящего в парах графитового катода. Наиболее подробно изучены процессы сорбции данными фильтрующими материалами природного радионуклида ²²⁶Ra. ПСУМ (в чистом виде) характеризуется высокой сорбционной активностью по отношению к природному радионуклиду ²²⁶Ra в воде. При фильтрации дистиллированной воды с растворённым в ней ²²⁶Ra через данный материал наблюдается снижение удельной радиоактивности в воде не менее чем в 100 раз. Этот вывод распространяется и на природные радионуклиды ²²⁴Ra и ²²⁸Ra, которые в химическом отношении являются полными аналогами радионуклида ²²⁶Ra. Предлагаемый композитно-фильтрующий материал CARBOVER на основе вспученного вермикулита из состава ПСУМ также обладает высокой сорбционной активностью по отношению к основным наиболее распространённым в подземных водах указанным природным радионуклидам (снижение удельной их активности в отфильтрованной воде до 80 %). Рассматриваются актуальные вопросы получения биотропной воды, которая усиливает сопряжение макромолекул биополимеров с водными кластерами. Ряд научно-технических решений, который обсуждается в данной работе, имеет патентную защиту.

Ключевые слова: свободные радикалы, фильтрующий материал, сорбционная активность, сорбционная емкость, биотропная вода

NEW TECHNOLOGIES FOR WATER DECONTAMINATION FROM RADIONUCLIDES AND INCREASING ITS BIOTROPISM

¹I. G. Mosyagin, ²E. Ya. Buzov, ²A. I. Gromov, ³V. G. Kuznetsov, ⁴V. I. Kasatkin, ⁴A. V. Kulikov,
²V. P. Ponimatkin, ⁵L. A. Rybina

¹Navy general headquarters; ²Biomedical Research Center «Diskretnaya Neyrodinamika»; ³Institute of problems in mechanical engineering of the Russian Academy of Sciences; ⁴Research Institute of Ship Building and Armament N. G. Kuznetsov Navy Academy; ⁵Pavlov Institute of Physiology of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Under discussion are the results of testing the sorption properties of new filtering materials like CARBOVER (Russian: КАРБОВЕР), which is plasma combination of carbon composite with exfoliated vermiculite surface, and plasma-stimulated carbon material (Russian: ПСУМ), derived from the nanotechnology suggested. The evaluation of sorption properties of the filtering materials has been done for main natural radionuclides of sanitary importance contained in fresh water (²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, ²³⁸U). According to the data of predesigned experiments, the nanotechnology used has been proved effective. The nanotechnology enables plasma stimulation of carbon materials to create sorbents, which are composites with prescribed properties. The key point of the given technology is decomposition of hydrocarbons caused by low-temperature plasma. In the function of low-temperature plasma arc-vacuum discharge plasma is used, with the discharge burning in vapors of graphite cathode. The sorption processes of natural radionuclide ²²⁶Ra by these filtering materials are examined in most details. Plasma-stimulated carbon material (in pure form) demonstrates high sorption performance in case of natural radionuclide ²²⁶Ra in water. After filtration of distilled water with ²²⁶Ra dispersed in it, the specific radioactivity in water has become at least 100 times less. This equally refers to the natural radionuclides ²²⁴Ra and ²²⁸Ra, which are chemically identical to the ²²⁶Ra. The suggested composite filtering material CARBOVER, based on exfoliated vermiculite from the composition of plasma-stimulated carbon material, also has high sorption qualities against the mentioned radionuclides most common in ground waters (with reduction of their specific radioactivity in filtered water of up to 80 %). As well under consideration are topical issues of obtaining biotropic water, which has the ability to strengthen the interfacing between biopolymer macromolecules and water clusters. A number of scientific and technical solutions discussed in the paper have patent protection.

Keywords: free radicals, the filter material, sorption activity, sorption capacity, biotropic water

Библиографическая ссылка:

Мосягин И. Г., Бузов Е. Я., Громов А. И., Кузнецов В. Г., Касаткин В. И., Куликов А. В., Пониматкин В. П., Рыбина Л. А. Новые технологии для очистки воды от радионуклидов и повышения её биотропности // Экология человека. 2016. № 11. С. 3–11.

Mosyagin I. G., Buzov E. Ya., Gromov A. I., Kuznetsov V. G., Kasatkin V. I., Kulikov A. V., Ponimatkin V. P., Rybina L. A. New Technologies for Water Decontamination from Radionuclides and Increasing Its Biotropism. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2016, 11, pp. 3-11.

В настоящее время наблюдаются высокие темпы негативных изменений в природе в результате антропогенной нагрузки на её ресурсы, в том числе водную среду [11, 14, 16]. Совершенно очевидно, что необходимы решительные преобразования в организации водоснабжения населения чистой питьевой водой, т. е. водой, в которой отсутствуют патогенные микроорганизмы и химические соединения, относящиеся к канцерогенам и обладающие мутагенной и цитотоксической активностью [4, 5, 15].

Надежное обеспечение населения страны качественной питьевой водой является высшим приоритетом. На территории Российской Федерации действует долгосрочная (до 2017 г.) федеральная целевая программа «Чистая вода», утвержденная постановлением Правительства РФ от 22.12.2010 г. № 1092, на выполнение которой направляются большие финансовые ресурсы.

Использование воды подземных горизонтов в питьевом водоснабжении при одновременном увеличении сбросов загрязняющих веществ (полиметаллы, фенолы и ряд других химических соединений) в водные объекты повышает значимость проблемы снабжения населения качественной питьевой водой [10, 12]. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы разработки фильтрующих материалов и технологий для очистки питьевой воды от различных микропримесей, в том числе радионуклидов.

Одним из важнейших показателей качества питьевой воды является содержание в ней природных радионуклидов (ПРН). Их наличие определяет дозы облучения населения за счет потребления питьевой воды [1]. Среднемировое значение этой дозы невелико – всего около 12 мкЗв/год, что составляет менее 1 % суммарных доз облучения населения с учётом всех природных источников [18, 20]. В разных регионах планеты, в том числе и на территории РФ, диапазон варьирования содержания ПРН в воде достигает 3–4 порядков. Проблема радиационной безопасности наиболее остро стоит в тех регионах, где питьевое водоснабжение населения осуществляется природной водой подземных горизонтов, для которой обычно характерно повышенное содержание отдельных ПРН. Причем кроме ^{222}Rn для большей части подземных природных вод в нашей стране наиболее характерным является повышенное содержание природного изотопа радия ^{226}Ra [19], реже – ^{228}Ra , ^{224}Ra , а в единичных случаях – ^{210}Pb , ^{210}Po [20]. В 36 субъектах РФ обнаружены превышения радиоактивности воды по суммарным показателям, а в 24 субъектах – превышение уровня вмешательства (УВ) по отдельным природным радионуклидам.

Для обеспечения радиационной безопасности при организации питьевого водоснабжения населения введены ограничения на содержание природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде. Эти ограничения сводятся к мероприятиям по снижению уровня радиоактивности воды. В некоторых случаях, однако, требуется введение запрета на её

использование для питьевых целей с переходом на альтернативные источники водоснабжения. С учётом современных представлений о риске возникновения неблагоприятных последствий облучения людей в Нормативах радиационной безопасности 1999, 2009 годов требования к показателям радиационной безопасности питьевой воды установлены в следующей форме: если УВ по содержанию радионуклидов в питьевой воде не превышены, дальнейшее снижение содержания радионуклидов в ней не является обязательным. Такой формулировкой признается, что идеальной в радиационном отношении является питьевая вода, в которой радионуклиды полностью отсутствуют.

Присутствие в значимых концентрациях техногенных радионуклидов в источниках питьевой воды наблюдается на территориях, загрязненных в результате крупных радиационных аварий. За счет глобальных выпадений ^{137}Cs и ^{90}Sr в следовых концентрациях могут присутствовать в поверхностных источниках водоснабжения. Между тем авария на японской АЭС «Фукусима-1» (2011) убедительно показала, что возможно загрязнение питьевой воды техногенными радионуклидами, и в значимых концентрациях. Чаще всего это может реализоваться для поверхностных источников питьевой воды. Их доля в питьевом водоснабжении населения нашей страны в среднем составляет менее 50 %. В Центральном и Южном федеральных округах превышает 50 %.

Именно поэтому создание эффективных сорбентов широкого спектра действия на основе отечественного и доступного сырья с реализацией продукта в водоочистительных технических устройствах следует считать стратегически важной социальной задачей.

Методы

В настоящей работе исследованы свойства инновационных сорбционных материалов комплексного типа, созданных с помощью новой технологии плазменно-стимулированного разложения углеводородов под действием низкотемпературной плазмы, когда в зону осаждения поступает поток возбужденного и ионизированного низкотемпературной плазмой углеродосодержащего газа (например, ацетилена). При этом в качестве низкотемпературной плазмы используется плазма вакуумно-дугового разряда, горящего в парах графитового катода.

На основе способа плазменной стимуляции углеродных материалов создана технология для получения принципиально новых фильтрующих составов типа КАРБОВЕР – ПСУМ [13].

Карбовер как композит представляет собой вермикулит с нанесенным на его поверхность материалом ПСУМ, который также был получен методом плазменно-стимулированного разложения ацетилена под действием плазмы вакуумно-дугового разряда.

Для исследования сорбционных свойств предложенных материалов разработана экспериментальная модель фильтрующей установки, в которой в качестве корпуса для загрузки фильтрующего состав использу-

ется вертикальная стеклянная колонка объемом около 0,2 дм³. В качестве модельной жидкости использовалась дистиллированная или природная вода из артезианских скважин с различным содержанием ПРН. Модельная жидкость подается в колонку снизу вверх, а скорость ее фильтрации регулируется краниками и изменением по высоте взаимного положения емкости с модельной жидкостью и фильтрующей установки.

Важнейшими характеристиками фильтрующих материалов, используемых в системах водоснабжения, являются сорбционная активность таких материалов, ёмкость и прочность сорбционных связей.

Величина сорбционной активности определяет эффективность осаждения радионуклидов при фильтрации воды, а её ёмкость — максимальную активность, которая может быть осаждена в единице массы или объема фильтрующего материала. Прочность сорбционных связей влияет на технологию очистки воды. Так, если она высока, фильтрующий материал может использоваться однократно. При слабых связях осевших радионуклидов сорбент можно промыть чистой водой и повторно использовать для осаждения радионуклидов.

Сорбционная активность фильтрующих материалов определялась как отношение удельной активности радионуклида в исходной «модельной» жидкости до ее фильтрации и в отфильтрованной среде после фильтрации заданного объема жидкости. Сорбционная ёмкость материалов определялась как максимальная активность радионуклида, которая может быть поглощена зернами фильтрующего материала. Определение сорбционной ёмкости фильтрующей загрузки по отношению к выбранным ПРН проводилось при дополнительном условии, чтобы эффективная удельная активность ПРН в фильтрующем материале не превышала 1 500 Бк/кг. Содержательный его смысл заключается в том, чтобы в процессе очистки воды не происходило образования производственных отходов с повышенным содержанием ПРН, обращение с которыми требует определенной регламентации по обеспечению радиационной безопасности населения.

Оценка прочности сорбционных связей проводилась по результатам выноса радионуклидов при обратной фильтрации дистиллированной воды через насыщенный фильтрующий материал.

Поскольку сорбционные свойства фильтрующих материалов определяются рядом дополнительных условий (температура процесса фильтрации и перепад давления жидкости на входе и выходе из колонки, линейная скорость фильтрации и высота столба фильтрующего материала, которые в конечном итоге определяют время контакта жидкости с его зернами), все исследования были проведены при комнатной температуре и постоянном расходе «модельной» жидкости.

При этом в качестве основного условия фильтрации воды через композицию было принято, чтобы линейная скорость фильтрации воды не превышала 5 м/час. Это условие для фильтрационной колонки с

внутренним диаметром $D = 48 \text{ мм} = 0,048 \text{ м}$ будет выполняться, если линейная скорость v (м/ч) фильтрации воды соответствует условию:

$$v \leq \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \approx 552,6 \cdot V, \quad (1)$$

в котором V — объемный расход «модельной» жидкости через фильтрующий материал в м³/час.

Если для v принять ограничение на уровне не более 5 м/час, то из формулы (1) получим допустимое значение объемного расхода воды при фильтрации:

$$V \leq \frac{5}{552,6} \approx 0,009 \text{ м}^3 = 9 \text{ л/час}, \quad (2)$$

Для гарантированного обеспечения этого условия объемный расход воды через фильтрующий материал в течение всего периода фильтрации нами поддерживался на уровне 1,5–2,5 л/час (линейная скорость воды через фильтрующий материал не превышала 1–2 м/час).

Контроль соблюдения баланса активности гамма-излучающих радионуклидов в экспериментальных исследованиях производился по соотношению:

$$V \cdot UA_{\text{до}} - V \cdot UA_{\text{после}} + M_C^0 \cdot A_C \approx M_C^V \cdot A_C^V, \text{ Бк} \quad (3)$$

где V — объем жидкости, пропущенной через фильтрующий материал, л; $UA_{\text{до}}$ и $UA_{\text{после}}$ — удельная активность радионуклида в модельной жидкости до и после фильтрации, Бк/кг; M_C^0 и M_C^V — масса фильтрующей загрузки в колонке до и после окончания фильтрации V л воды, кг; A_C и A_C^V — удельная активность радионуклида в материале фильтрующей загрузки до и после фильтрации V л воды, Бк/кг, определяемые методом гамма-спектрометрии.

Знак приблизительного равенства в уравнении (3) поставлен в силу следующих причин. Во-первых, отработанный фильтрующий материал нами не высушивался до исходного состояния, так что его масса отличалась от исходной массы фильтрующей загрузки. Вследствие этого активность радионуклидов оказывается распределенной между сорбентом и водой в пространстве фильтрующей загрузки. Во-вторых, объем воды, прошедшей через фильтр, определялся по объему отфильтрованной воды, накопленной в сборной емкости, так что объем воды на входе в экспериментальную установку был несколько больше объема отфильтрованной воды. Эта разница в объеме воды не превышала 50–70 мл, так что нарушение условий баланса по соотношению (3) может составлять не более 3–5 %.

Результаты определения удельной активности радионуклидов в фильтрующих материалах приведены в табл. 1. Выбор определяемых радионуклидов в фильтрующих материалах диктовался тем, что первые три из них — ²²⁶Ra, ²³²Th и ⁴⁰K являются традиционно присутствующими во всех минеральных материалах, а ¹³⁷Cs планировалось контролировать в ходе экспериментальных исследований.

Таблица 1
Содержание природных радионуклидов и ^{137}Cs в фильтрующих материалах и их компонентах ($M \pm m$)

Фильтрующая загрузка	Масса загрузки, г	Удельная активность радионуклидов, Бк/кг			
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{137}Cs
ПСУМ	$39,1 \pm 0,4$	<5	<5	<40	<2*
Карбовер	$36,3 \pm 0,4$	19 ± 5	<5	140 ± 40	<2*
Вспученный вермикулит	$34,6 \pm 0,5$	16 ± 7	14 ± 7	140 ± 40	—

Примечание. * — нижний предел обнаружения ^{137}Cs в соответствии с методикой выполнения измерений. Реально такая величина означает, что ^{137}Cs в материале отсутствует.

Для более корректного определения сорбционных характеристик фильтрующих материалов в экспериментальных исследованиях модельная жидкость (дистиллированная или природная вода) обогащалась отдельными природными радионуклидами. Это связано с тем, что удельная активность ПРН в природных источниках питьевой воды редко бывает значительно выше их УВ (0,5 Бк/кг для ^{226}Ra , 0,11 Бк/кг для ^{210}Po , 0,2 Бк/кг для ^{210}Pb). Вследствие этого использование воды без обогащения радионуклидами потребует фильтрации через материал многих десятков и сотен литров модельной жидкости и соответственно больших временных затрат. Кроме того, при низком содержании радионуклидов заметно возрастает погрешность определения их удельной активности, что в конечном итоге сказывается на качестве определения сорбционных свойств материалов.

Для обогащения «модельной» жидкости ^{226}Ra использовался образцовый раствор радия, а природные радионуклиды ^{210}Po и ^{210}Pb нами получались по специальной технологии из воздуха с высоким содержанием ^{222}Rn .

Отметим, что при моделировании процессов фильтрации жидкостей через твердые и сыпучие материалы важно исключить так называемый пристеночный эффект, при котором значительная часть потока жидкости проходит вблизи стенки фильтрующей колонки, минуя основной объем адсорбента. Как показали результаты исследований с использованием окрашенной жидкости, которая пропусклась через экспериментальную установку, этот эффект в наших исследованиях был незначительным.

Оценка сорбционных характеристик новых фильтрующих материалов проведена для основных гигиенически значимых природных радионуклидов, которые наиболее распространены в подземных природных водах Северо-Западного региона страны, — ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po и ^{238}U . В отдельных исследованиях оценивались также сорбционные свойства фильтрующих материалов по отношению к техногенным радионуклидам ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{131}I (здесь рассматриваются процессы сорбции фильтрующими материалами только отдельных природных радионуклидов).

Результаты

Анализ полученных данных показал, что сорбционная активность ПСУМ при фильтрации через него

природного радионуклида ^{226}Ra в дистиллированной воде составляет около 290 с 95 % доверительным значением показателя в интервале 195–380. Оценка нижней границы сорбционной емкости данного сорбента составила не менее 1 800 Бк/кг. Эта величина получена нами именно как нижняя граница оценки показателя по результатам однократной фильтрации 5 л дистиллированной воды с растворенным радионуклидом ^{226}Ra .

Исследования сорбционных свойств фильтрующего материала ПСУМ показали, что применение его в чистом виде технологически малоперспективно в силу исключительно тонкой дисперсности материала, вследствие чего фильтрация воды через него идет крайне медленно. Поэтому все дальнейшие исследования проводились с использованием композитного фильтрующего материала типа карбовер на основе вспученного вермикулита и состава ПСУМ. Размеры зерен материала карбовер составляют 1–3 мм, так что фильтрация жидкости через него происходит достаточно эффективно.

Исследования сорбционных свойств вспученного вермикулита в чистом виде показали, что его сорбционная активность составляет около 3,0 с 95 % доверительным значением показателя в интервале 2,0–4,6. Это несколько выше, чем для обычных фильтрующих материалов природного происхождения. Вероятно, это связано с высокой удельной площадью поверхности зерен вспученного вермикулита, которые образуются при специальной обработке природного вермикулита. В пользу этого свидетельствует исключительно низкая плотность вспученного вермикулита, которая составляет около 0,130 г/см³, в то время как плотность природного вермикулита равна 2,4–2,7 г/см³.

Учитывая это, можно было ожидать, что сорбционные свойства композитного материала карбовер будут заметно отличаться в лучшую сторону по сравнению с характеристиками вспученного вермикулита в чистом виде. Для оценки численных значений сорбционных свойств материала карбовер проведена серия исследований по следующей схеме: «модельная» жидкость с постоянным содержанием радионуклидов пропусклась через фильтрующую установку, и уже после пропускания определенного ее объема через фильтрующий материал отбирались пробы объемом 0,2 л для определения удельной активности радионуклидов. При этом суммарный объем отфильтрованной жидкости до отбора данной пробы определяется как сумма объемов воды, прошедшей через фильтр до ее отбора, включая и объем отобранной пробы (табл. 2).

Легко видеть, что по мере увеличения объема дистиллированной воды, пропущенной через материал, его сорбционная активность по отношению к ^{226}Ra постепенно снижается.

Снижение сорбционной активности материала происходит достаточно медленно: если при фильтрации первого литра воды в его объеме осаждается около 16,5 Бк ^{226}Ra , то после фильтрации 9,3 л —

Таблица 2

Изменение удельной активности ^{226}Ra (УА ^{226}Ra) в дистиллированной воде в процессе фильтрации через материал карбовер ($M \pm m$)

Суммарный объем отфильтрованной дистиллированной воды с растворенным Ra до отбора пробы на анализ, л	УА ^{226}Ra , Бк/кг
0,0	21,34 ± 4,27
1,2	4,81 ± 0,96
3,4	7,65 ± 1,53
6,6	8,08 ± 1,62
9,3	8,95 ± 1,79

12,4 Бк, то есть примерно на 25 % меньше. Анализ полученных данных позволил оценить сорбционную активность материала карбовер по отношению к ^{226}Ra при фильтрации дистиллированной воды, которая составила около 4,4 с доверительным значением показателя в интервале 3,0–6,7. Сорбционная активность материала карбовер оказалась примерно в 1,5 раза выше, чем для вспученного вермикулита. Анализ полученных данных позволил также оценить сорбционную емкость материала, которая составила около 3 500 Бк/кг.

При обратной промывке дистиллированной водой материала карбовер после его насыщения ^{226}Ra установлено, что выноса ^{226}Ra с промывной водой из объема фильтрующего материала практически не наблюдается (табл. 3). Суммарная активность ^{226}Ra , которая перешла в промывные воды при пропускании 5,4 л дистиллированной воды, составила всего около 1,1 Бк, в то время как накопленная активность ^{226}Ra в объеме материала карбовер в экспериментальной установке составляла более 125 Бк.

Таблица 3

Удельная активность ^{226}Ra в дистиллированной воде после промывки материала карбовер, насыщенного ^{226}Ra ($M \pm m$)

Суммарный объем отфильтрованной дистиллированной воды до отбора пробы на анализ, л	УА ^{226}Ra , Бк/кг
0,2	1,82 ± 0,36
2,4	0,15 ± 0,03
5,4	0,12 ± 0,02

В реальных условиях природные подземные воды имеют обычно достаточно высокую минерализацию и содержат взвешенные и растворенные минеральные компоненты в форме различных химических соединений. Поэтому процессы сорбции природных радионуклидов при фильтрации через материал карбовер реальных природных вод и растворов этих радионуклидов в дистиллированной воде серьезно отличаются. В первую очередь это связано с тем, что механизмы сорбции растворенных в природной воде минеральных компонент и природных радионуклидов могут быть конкурирующими. С учетом этой закономерности нами проведены исследования сорбционных характеристик материала карбовер с использованием реальной природной воды из артезианской скважины,

которая дополнительно была обогащена природными радионуклидами ^{210}Pb и ^{210}Po (табл. 4).

Таблица 4

Изменение удельной активности радионуклидов в природной воде в процессе фильтрации ее через материал карбовер ($M \pm m$)

Суммарный объем отфильтрованной воды до отбора пробы на анализ, л	УА радионуклидов, Бк/кг		
	^{226}Ra	^{210}Po	^{210}Pb
0,0	6,73 ± 1,27	3,01 ± 0,60	2,56 ± 0,51
3,0	2,61 ± 0,52	1,33 ± 0,27	0,86 ± 0,19
10,0	3,61 ± 0,72	1,74 ± 0,35	1,12 ± 0,22
19,0	4,58 ± 0,92	1,66 ± 0,33	0,80 ± 0,16

Сравнение данных, содержащихся в табл. 2 и 4, показывает, что сорбционная активность фильтрующего материала карбовер при фильтрации природной воды оказывается несколько ниже, чем при фильтрации дистиллированной воды, тем не менее она по-прежнему является достаточно высокой. Интересно также, что сорбционная активность материала карбовер по отношению к ^{210}Pb и ^{210}Po оказалась примерно такой же, как и к ^{226}Ra . Причем и динамика снижения сорбционной активности материала карбовер по отношению к этим природным радионуклидам остается практически одинаковой, несколько отличаясь в лучшую сторону для ^{210}Pb .

Рассмотрим результаты специальных исследований, в которых через материал карбовер фильтровалась вода из артезианской скважины с достаточно высокой (около 0,9 г/л) минерализацией, обогащенная всеми основными гигиенически значимыми природными радионуклидами ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb и ^{210}Po (табл. 5).

Таблица 5

Изменение удельной активности радионуклидов в природной воде, обогащенной ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb и ^{210}Po , при фильтрации через материал карбовер ($M \pm m$)

Суммарный объем отфильтрованной воды до отбора пробы на анализ, л	УА радионуклидов, Бк/кг			
	^{238}U	^{226}Ra	^{210}Po	^{210}Pb
0,0	0,82 ± 0,16	4,85 ± 0,97	3,20 ± 0,64	6,98 ± 1,39
5,0	0,10 ± 0,05	2,73 ± 0,55	1,36 ± 0,27	4,59 ± 0,59
15,0	0,31 ± 0,08	3,39 ± 0,68	2,29 ± 0,46	7,07 ± 1,41

Как следует из анализа данных табл. 5, динамика снижения сорбционной активности материала карбовер по отношению к ^{226}Ra и ^{210}Po в пределах погрешности измерений практически одинакова. Однако сорбционная активность материала по отношению к ^{210}Pb оказалась несколько ниже, чем по отношению к ^{210}Po , для которого она остается достаточно высокой. Как и в случае фильтрации дистиллированной воды, обогащенной ^{210}Pb , материал карбовер довольно быстро насыщается этим радионуклидом и далее

перестает его осаждать. Так, после фильтрации 15 л воды с содержанием ²¹⁰Pb на уровне около 7 Бк/кг, этот радионуклид практически перестает осаждаться.

Что касается природного радионуклида ²³⁸U, то как сорбционная активность, так и сорбционная ёмкость материала карбовер по отношению к этому радионуклиду оказались достаточно высокими. На начальном этапе фильтрации высокоминерализованной природной воды наблюдается практически полное удаление ²³⁸U из нее. По мере насыщения сорбционная активность материала карбовер постепенно снижается. Тем не менее она остается достаточно высокой даже после фильтрации 0,5 м³ природной воды в расчете на 1 кг фильтрующего материала.

Следует отметить, что проблемы с качеством воды источников питьевого водоснабжения населения, связанные с повышенным содержанием ²³⁸U, в нашей стране встречаются довольно редко. Во-первых, это связано с довольно высоким (3 Бк/кг) значением уровня вмешательства для этого радионуклида в питьевой воде, во-вторых, в большинстве случаев этот радионуклид находится в слаборастворимой форме и довольно прочно удерживается в твердой фазе вмещающих пород. Тем не менее в ряде регионов страны (Оренбургская и Челябинская области, Красноярский край и др.) встречаются подземные природные воды с довольно высоким содержанием этого радионуклида. Анализ результатов экспериментальных исследований позволил получить оценку сорбционных свойств материала карбовер по отношению к основным гигиенически значимым природным радионуклидам, которые чаще всего присутствуют в природных подземных водах (табл. 6). Для большей наглядности сорбционная активность фильтрующего материала карбовер в табл. 6 определена по формуле:

$$CA = (1 - UA_{\text{после}}/UA_{\text{до}}) \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где, $UA_{\text{до}}$ и $UA_{\text{после}}$ — удельная активность радионуклида в природной воде до и после фильтрации через экспериментальную установку с материалом карбовер.

Таблица 6

Сорбционные свойства материала карбовер по отношению к отдельным природным радионуклидам при фильтрации природной воды (M ± m)

Сорбционная характеристика	Природный радионуклид			
	²²⁶ Ra	²³⁸ U	²¹⁰ Po	²¹⁰ Pb
Сорбционная активность, %	68	88	58	66
Сорбционная емкость, Бк/кг	3500	> 700	800	900

При исследованиях сорбционных свойств материала карбовер нами не анализировались процессы осаждения других изотопов ²³⁸U и ²²⁶Ra, которые обычно присутствуют в природных водах. Совершенно очевидно, что фильтрующие свойства карбовера, полученные для ²³⁸U и ²²⁶Ra, в полной мере могут быть интерпретированы и на другие их изотопы в силу их полной химической аналогии.

Обсуждение результатов

Плазменно фильтрующий материал ПСУМ в чистом виде характеризуется высокой сорбционной активностью по отношению к природному радионуклиду ²²⁶Ra в воде. При фильтрации дистиллированной воды с растворенным в ней ²²⁶Ra через данный материал наблюдается снижение удельной активности радионуклида в воде не менее чем в 100 раз. Этот вывод распространяется и на природные радионуклиды ²²⁴Ra и ²²⁸Ra, которые в химическом отношении являются полными аналогами радионуклида ²²⁶Ra.

Композитный фильтрующий материал карбовер также обладает высокой сорбционной активностью по отношению к основным наиболее распространенным в подземных водах природным радионуклидам ²²⁶Ra, ²²⁴Ra, ²²⁸Ra, ²³⁸U, ²³⁵U, ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po, которая обеспечивает снижение их удельной активности в отфильтрованной воде до 80 %.

Учитывая одновременно достаточно высокую сорбционную емкость по отношению к указанным природным радионуклидам, фильтрующие материалы карбовер с различным массовым содержанием ПСУМ могут использоваться для эффективной очистки питьевой воды от указанных природных радионуклидов. При этом увеличение массового содержания ПСУМ в составе фильтрующего материала карбовер при одновременном увеличении удельной площади его поверхности на единицу массы материала позволит заметно улучшить также и его сорбционные характеристики.

По сравнению с традиционными фильтрующими материалами природного происхождения материал карбовер обладает одним интересным отличием, которое может положительно повлиять на перспективы его использования для очистки питьевой воды от природных радионуклидов, — его плотность составляет около 0,130 г/см³. Это во многом уникальное свойство материалов карбовер может сыграть положительную роль при обращении с отходами, которые образуются в процессе очистки питьевой воды.

Физико-химические свойства сорбента карбовер могут служить основанием к применению новых фильтрующих материалов, созданных на основе данной технологии для очистки больших объёмов питьевой воды от природных и техногенных радионуклидов.

Первой фазой многостадийной водоподготовки является обеззараживание воды путём элиминации бактерий и вирусов — возбудителей инфекционных заболеваний, а также очистка её от канцерогенов и иных химических веществ, создающих угрозу жизни или здоровью человека. Вторая фаза — это кондиционирование воды на основе применения специальных технических решений. Речь идет об использовании технологий, повышающих биотропность воды.

Проникая в организм человека через легкие, кожные покровы или желудочно-кишечный тракт, подавляющее большинство различных чужеродных химических веществ (ксенобиотиков) подвергается целому ряду биохимических превращений. При этом

происходит образование свободных радикалов (СР), активных форм кислорода (синглетный кислород, супероксидный анион-радикал, перекись водорода, гидроксильный радикал и др.) и перекисей липидов, функционирующих внутри клеток, в составе клеточных мембран и во внеклеточных жидкостях. Как известно, СР могут вызывать повреждения ДНК, ферментов и других белков. Кроме того, они могут накапливаться в богатых липидами тканях. Свободные радикалы могут модифицировать антигены собственного организма таким образом, что они становятся чужеродными и к ним начинают вырабатываться антитела. Следовательно, СР инициируют развитие так называемых болезней свободных радикалов (Free Radical Diseases) [17]. Примером патологического состояния, в патогенезе которого участвуют СР и перекиси, могут служить радиационные поражения [8]. В результате интенсификации биохимических реакций, обеспечивающих сохранение гомеостаза при действии проникающей радиации, наблюдается активация свободнорадикальных процессов и перекисного окисления липидов (ПОЛ). В живом организме только часть поглощенной энергии приходится на биомолекулы (прямое действие ионизирующего излучения), а остальное поглощается водой, что сопровождается процессом ее радиолиза. Продукты радиолиза — это прежде всего СР и перекиси, вызывающие образование высокотоксичных метаболитов липидной и хиноидной природы. Важно отметить, что продукты ПОЛ, способные вызывать разрывы цепей ДНК, получили наименование первичных радиотоксинов. Именно им отводится существенная роль в развитии лучевого поражения клетки. К первичным радиотоксинам относят также продукты окисления полифенолов, которые обнаруживаются в облученных клетках. Их избыточное накопление приводит к переносу электронов не по дыхательной цепи, что происходит в нормально метаболизирующей клетке, а через образовавшиеся хиноны. Результатом этого является снижение концентрации аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ) — главной биомашинны. Вследствие этого нарастает внутриклеточная гипоксия и развивается энергодефицитное её состояние. Этот механизм уже чисто химическим путем приводит к изменениям биомолекул. В этом случае имеет место не прямое (опосредованное) действие проникающей радиации.

Теория информационно-фазового состояния воды в контексте электромагнитных взаимодействий биологических объектов (вплоть до уровня атомов и электронов) радикально изменяет подход к изучению этиологии и патогенеза некоторых болезней и причин преждевременного старения организма человека. В этой связи возникает необходимость уточнить спектр биотропных свойств воды.

Как известно, ядра атомов не принимают участия в химических реакциях. Связь между ними осуществляется электронами. Именно поэтому химические свойства атомов зависят в основном от состояния их электронных оболочек [7]. Очень важно пони-

мать, как располагаются электроны по орбиталиям. По классификации IUPAC (международный союз в теоретической и прикладной химии), вода является оксидом водорода (H_2O). Молекула воды состоит из 36 элементарных частиц — 18 протонов и 18 электронов. Ядра атомов в молекуле воды образуют равнобедренный треугольник с тупым углом $104,5^\circ$ при атоме кислорода. Поскольку ядра атомов водорода и кислорода расположены несимметрично, молекула воды имеет форму тетраэдра, в вершинах которого имеется 4 полюса зарядов. Два отрицательных полюса приходятся на две неподеленные пары электронов атома кислорода, а два положительных заряда сосредоточены на двух атомах водорода. С этой точки зрения молекула воды представляет собой диполь, положительный и отрицательный полюсы которого пространственно разделены (дипольный момент как векторная величина направлен по оси диполя от положительного заряда к отрицательному). Каждая молекула воды способна соединяться с четырьмя ближайшими к ней молекулами. Это приводит к образованию групп (ассоциатов), состоящих из двух, трех и более молекул. Структура воды исключительно изменчива в зависимости от окружающей среды (атмосферного давления, температуры, воздействия физических полей). Полярность молекулы воды и относительно малые ее размеры (радиус молекулы воды составляет 0,96 ангстрем) приводит к тому, что вода является хорошим растворителем для веществ с ионным или полярным ковалентным типом связи.

Водная среда это иерархически организованный жидкий кристалл. Вот почему изменение одного структурного элемента в этом кристалле под действием любого внешнего фактора приводит к перестройке (перекодировке) всей структуры воды. Данный механизм объясняет и «память» воды, и ее информационные свойства. Вода «распознаёт» направленные к ней информационные сигналы. На основании анализа молекул воды в различных агрегатных состояниях была высказана гипотеза о том, что её структура (в состоянии талой воды) практически соответствует треугольнику «золотой пропорции» [3]. В настоящее время существует много научных фактов, подтверждающих роль структурированной воды при возникновении клеточной самоорганизации и организации ранних форм жизни в условиях первичной гидросферы [9]. До настоящего времени во многих странах требования к питьевой воде сводятся к тому, чтобы в ней отсутствовали реально и потенциально опасные микроорганизмы, а содержание вредных веществ соответствовало санитарным правилам (гигиеническим нормативам). Между тем ни зарубежные, ни отечественные стандарты не принимают во внимание значение динамической структурной организации питьевой воды. Нами предложен способ создания биотропной воды. Эта задача решается методом резонансного акустического воздействия на воду модулированными ЭЭГ-ритмами [6]. Производится фазовая (частотная и/или амплитудная) модуляция

сигнала согласно формуле, связанной с основными закономерностями золотой пропорции.

В процессе приготовления биотропной воды также достигается эффект сохранения и повышения окислительно-восстановительного потенциала. Указанные эффекты предотвращают не только развитие заболеваний радикальной природы, но и замедляют процесс старения организма. Предлагаемый метод обработки (структурирования воды) содержит солениод, расположенный внутри ёмкости с водой. Солениод подключён к выходу звуковой карты компьютера. При этом осуществляется подача на выход звуковой карты переменного электрического сигнала, промодулированного по частоте в диапазонах электрической активности головного мозга (дельта, тета, альфа, бета-1 и бета-2) по отдельности и в разных сочетаниях между собой, в зависимости от функционального состояния пациента. Тем самым происходит структурирование воды в соответствии с суммарным паттерном управляющих сигналов центральной нервной системы — высшего звена регуляции функционального состояния организма.

Осмысление этих фактов приводит к необходимости существенно изменить подход к разработке устройств с расширенным диапазоном технических возможностей для многостадийной водоподготовки. Подвергая воду воздействию электромагнитного поля, модулированных частотой биоритмов, мы тем самым существенно усиливаем ее биологические эффекты, основанные на резонансных явлениях [2]. Это приводит к нормализации функционального состояния организма, повышает статус его тренированности (адаптированности), уровень иммунной и антиоксидантной защиты.

Список литературы

1. Барковский А. Н., Барышков Н. К., Кормановская Т. А., Кувшинников С. И., Липатова О. Е., Перминова Г. С., Репин В. С., Романович И. К., Стамат И. П., Тутельян О. Е. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2004 году : справочник. СПб. : Наука, 2006. 62 с.
2. Бауэр Э. С. Теоретическая биология. М. ; Л. : Изд-во ВИЭМ, 1995. 206 с.
3. Белянин В. Жизнь, молекулы воды и золотая пропорция // Наука и жизнь. 2004. № 10. С. 2–9.
4. Бобун И. И., Иванов С. И., Унгурияну Т. Н., Гудков А. Б., Лазарева Н. К. К вопросу о региональном нормировании химических веществ в воде на примере Архангельской области // Гигиена и санитария. 2011. № 3. С. 91–95.
5. Бобун И. И., Бузинов Р. В., Шишко Л. А., Болтенков В. П., Моргунов Б. А., Гудков А. Б. Особенности вирусного загрязнения питьевой воды в Архангельской области // Экология человека. 2016. № 2. С. 3–7.
6. Бузов Е. Я., Громов А. И., Касаткин В. И., Пониматкин В. П., Рыбина Л. А. Система для обработки воды : пат. на полезную модель 124259 Рос. Федерация. № 124259 ; заявл. 27.01.2012 ; опубл. 20.01.2013. Бюл. № 2. 9 с.
7. Довгуша В. В., Пискарев Л. Н. Познавая мир живого. СПб. : Северный Дом, 2003. 420 с.

8. Источники и эффекты ионизирующего излучения. Отчет НКДАР ООН 2000 года Генеральной Ассамблее с научными приложениями. Т. 1: Источники (ч. 1) / пер. с англ., под ред. акад. РАМН Л. А. Ильина и проф. С. П. Ярмоненко. М. : РАДЭКОН, 2002. 308 с.

9. Каленикин С. Жизнь — это одушевлённая вода // Наука и религия. 2007. № 1. С. 4–6.

10. Карпин В. А., Кострюкова Н. К., Гудков А. Б. Радиационное воздействие на человека радона и его дочерних продуктов распада // Гигиена и санитария. 2005. № 4. С. 13–17.

11. Онищенко Г. Г. О санитарно-эпидемиологическом состоянии окружающей среды // Гигиена и санитария. 2013. № 2. С. 4–10.

12. Онищенко Г. Г., Романович И. К. Основные направления обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации на современном этапе // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 5–22.

13. Пониматкин В. П., Процаенко С. В., Кузнецов В. Г., Бузов Е. Я., Касаткин В. И. Установка для производства сорбента типа КАРБОВЕР — ПСУМ : пат. 2544645 Рос. Федерация. № 2544645 ; заявл. 28.09.2012 ; опубл. 20.03.2015. Бюл. № 8. 6 с.

14. Рахманин Ю. А., Красовский Г. Н., Егорова Н. А., Михайлова Р. И. 100 лет законодательного регулирования качества питьевой воды. Ретроспектива, современное состояние и перспективы // Гигиена и санитария. 2014. Т. 93, № 2. С. 5–18.

15. Рахманин Ю. А., Михайлова Р. И. Окружающая среда и здоровье: приоритеты профилактической медицины // Гигиена и санитария. 2014. Т. 93, № 5. С. 5–10.

16. Унгурияну Т. Н., Новиков С. М., Бузинов Р. В., Гудков А. Б., Осадчук Д. Н. Риск для здоровья населения от химических веществ, загрязняющих атмосферный воздух, в городе с развитой целлюлозно-бумажной промышленностью // Гигиена и санитария. 2010. № 4. С. 21–24.

17. Хавинсон В. Х., Баринов В. А. Свободнорадикальное окисление и старение. СПб. : Наука, 2003. 327 с.

18. Botezatu E. Contribution of the dietary ingestion to the natural radiation exposure of Romanian population // J. Hyg. Public Health. 1994. N 44 (1–2). P. 19–21.

19. Bradley E. J. Contract Report. National radionuclides in environmental media. NRPB-M439. 1993. 54 p.

20. Muth H., Rajewsky B., Hantke H. J. et al. The normal radium content and the $^{226}\text{Ra}/\text{Ca}$ ratio of various food, drinking water and different organs and tissues of the human body // Health Phys. 1960. N 2. P. 239–245.

References

1. Barkovskii A. N., Baryshkov N. K., Kormanovskaya T. A., Kuvshinnikov S. I., Lipatova O. E., Perminova G. S., Repin V. C., Romanovich I. K., Stamat I. P., Tutel'yan O. E. *Dozy oblucheniya naseleniya Rossiiskoi Federatsii v 2004 godu : spravochnik* [Doses to the population of the Russian Federation in 2004. Guide]. Saint Petersburg, Science Publ., 2006, 62 p.
2. Bauer E. S. *Teoreticheskaya biologiya* [Theoretical biology]. Moscow, Leningrad, 1995, 206 p.
3. Belyanin V. Life, the water molecules and the Golden ratio. *Nauka i zhizn'* [Science and life]. 2004, 10, pp. 2-9. [in Russian]
4. Bobun I.I., Ivanov S.I., Unguryanu T.N., Gudkov A.B., Lazareva N.K. On the issue of regional normalization of chemicals in water as an example of the Arkhangelsk Region. *Gigiya i sanitariya*. [Hygiene and Sanitation] 2011, 3, pp. 91-95. [in Russian]

5. Bobun I. I., Buzinov R. V., Shishko L. A., Boltenkov V. P., Morgunov B. A., Gudkov A. B. Features of viral contamination of drinking water in Arkhangelsk region. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2016, 2, pp. 3-7. [in Russian]

6. Buzov E. Ya., Gromov A. I., Kasatkin V. I., Ponimatkin V. P., Rybina L. A. *Sistema dlya obrabotki vody : pat. na poleznuyu model' 124259 Ros. Federatsiya*. [System for water treatment. Pat. for utility model 124259 Rus. Federation. N 124259], publ. 20.01.2013. Bul. N 2, 9 p.

7. Dovgusha V. V., Piskarev L. N. *Poznavaya mir zhivogo* [Knowing the world of the living]. Saint Petersburg, North House Publ., 2003, 420 p.

8. *Istochniki i effekty ioniziruyushchego izlucheniya. Otchet NKDAR OON 2000 goda Ge-neral'noi Assamblei s nauchnymi prilozheniyami. T. 1: Istochniki (ch. 1)* [Sources and effects of ionizing radiation. Report of 2000 year for General Assembly of UN with scientific annexes. Vol. 1. Sources (pt. 1)], per. s angl., pod red. akad. RAMN L. A. Il'ina i prof. S. P. Yarmonenko, Moscow, RADEKON Publ., 2002, 308 p.

9. Kalenikin S. Life is animated water. *Nauka i religiya* [Science and religion], 2007, 1, pp. 4-6. [in Russian]

10. Karpin V. A., Kostryukova N. K., Gudkov A. B. Human radiation action of radon and its daughter disintegration products. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation]. 2005, 4, pp. 13-17. [in Russian]

11. Onishchenko G. G. Sanitary and epidemiological state of the environment. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation]. 2013, 2, pp. 4-10 [in Russian]

12. Onishchenko G. G., Romanovich I. K. The main directions of radiation safety of the population of the Russian Federation at the present stage. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation Hygiene]. 2014, 7 (4), pp. 5-22. [in Russian]

13. Ponimatkin V. P., Protsaenko S. V., Kuznetsov V. G., Buzov E. Ya., Kasatkin V. I. *Ustanovka dlya proizvodstva sorbenta tipa KARBOVER - PSUM, pat. 2544645 Ros. Federatsiya. N 2544645* [Equipment for the production of sorbent type CARBOVER - PSUM, pat. 2544645 Rus. Federation. N 2544645, publ. 20.03.2015. Bul. N 8, 6 p.

14. Rakhmanin Yu. A., Krasovskii G. N., Egorova N. A., Mikhailova R. I. 100 years of legislative regulation of drinking water quality. Retrospective, current co-state and prospects. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation], 2014, 93 (2), pp. 5-18. [in Russian]

15. Rakhmanin Yu. A., Mikhailova R. I. Environment and Health: Priorities Preventive Medicine. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation]. 2014, 93 (5), pp. 5-10. [in Russian]

16. Unguryanu T. N., Novikov S. M., Buzinov R. V., Gudkov A. B., Osadchuk D. N. Public health risk from chemicals, air pollutants in the city with developed pulp and paper industry. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation]. 2010, 4, pp. 21-24. [in Russian]

17. Havinson V. H., Barinov V. A. *Svobodnoradikal'noe okislenie i starenie* [Free-Radical oxidation and aging]. Saint Petersburg, Science Publ., 2003, 327 p.

18. Botezatu E. Contribution of the dietary ingestion to the natural radiation exposure of Romanian population. *J. Hyg. Public Health*. 1994, 44 (1-2), pp. 19-21.

19. Bradley E. J. Contract Report. National radionuclides in environmental media. NRPB-M439, 1993, 54 p.

20. Muth H., Rajewsky V., Hantke H. J. et al. The normal radium content and the ²²⁶Ra/Ca ratio of various food, drinking water and different organs and tissues of the human body. *Health Phys.* 1960, 2, pp. 239-245.

Контактная информация:

Мосягин Игорь Геннадьевич — доктор медицинских наук, профессор, действительный член Российской академии военных наук, полковник медицинской службы, начальник медицинской службы Главного командования Военно-морского флота Российской Федерации

Адрес: 191055, г. Санкт-Петербург, Адмиралтейский проезд, д. 1

Тел./факс: +7 812 4940172; +7 911 195 11 76

E-mail: mosyagin-igor@mail.ru