

УДК 502.65:621.039.75:628.3

*Ю. В. Бондарь, С. В. Кузенко**ГУ “Институт геохимии окружающей среды” НАН Украины, г. Киев***АДСОРБЦИЯ СТРОНЦИЯ НА КОМПОЗИТНЫЕ ВОЛОКНА
С ОСАЖДЕННЫМ СЛОЕМ ФЕРРИГИДРИТА**

Синтезированы новые композитные волокна путем *in situ* осаждения слоя 2-линейчатого ферригидрита на поверхность модифицированных полипропиленовых волокон. Композитные волокна показали высокую химическую устойчивость как в кислых, так и щелочных растворах. Представлены результаты изучения адсорбции ионов стронция на синтезированные волокна в зависимости от времени контакта, pH, начальной концентрации стронция и концентрации ионов кальция в модельных растворах. Установлен pH-зависимый и двухстадийный характер адсорбции стронция. Присутствие ионов кальция в растворе подавляет адсорбцию стронция на композитные волокна.

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы, адсорбция, стронций, композитные волокна, полипропилен, ферригидрит.

Устойчивое развитие атомной энергетики во многом зависит от экологически приемлемого решения проблемы обращения с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО). Особую проблему представляют низкоактивные ЖРО как в связи с большим объемом уже накопленных отходов, так и с постоянным их образованием.

Во многих случаях эффективным способом очистки ЖРО является сорбционное извлечение радионуклидов до достижения уровня радиационной безопасности очищенных растворов.

Стронций-90, наряду с цезием-137, обуславливает более 90% активности низкоактивных ЖРО. Несмотря на немалый ассортимент органических и неорганических адсорбентов, синтезированных для селективного связывания Sr-90, поиск новых недорогих и эффективных сорбционных материалов все еще остается актуальной задачей.

Полевые наблюдения на загрязненных территориях Беларуси показали, что накопление Sr-90 и Cs-137 в количествах, превышающих фон в 5-10 раз, происходит на аморфных и слабо окристаллизованных гидроксидах железа и марганца [1]. Изучение форм нахождения радионуклидов в этих образцах позволило выявить связь основной массы Sr-90 с оксидной фракцией (32—58%) при относительно высоких показателях обменной (16—48%) и водорастворимой (1—9%) форм, а местами повышенной доли органогенной (5—18 %) формы [2]. Лабораторные исследования подтвердили высокую сорбционную способность искусственно полученных аморфных гидроксидов железа и марганца по отношению к Sr-90 и Cs-137 при значениях pH 4—9 (близких к природным). При этом, свежесозаженный гидроксид железа ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) продемонстрировал более высокую поглотительную способность по отношению к радиостронцию, в то время как гидратированный оксид марганца ($\text{MnO}(\text{OH})_2$) лучше сорбировал радиоцезий [3].

В другой работе был исследован керновый материал скважины, пробуренной в скальных породах вблизи водоема-хранилища жидких радиоактивных отходов (оз. Карачай, Россия) [4]. Радиогеохимический анализ кернового материала, представленного кусками-монолитами с разных глубин, позволил авторам обнаружить, что основная активность сосредоточена в приповерхностной части разреза (до глубины 30—40 м). Наибольшие удельные активности приурочены к трещинам разного порядка, поверхность которых покрыта гидроксидами железа, глинистым материалом, лейкоксенизированным сфеном и лейкоксеном. Основная бета- и альфа-активность обусловлена стронцием-90 (3470 Бк/кг), цезием-137 (56 Бк/кг), ураном-238(234) (24—27) Бк/кг), торием-230 (22 Бк/кг), а также кобальтом-60, плутонием-239(240). Авторы сделали вывод о преимущественно сорбционном механизме задержки радионуклидов, мигрирующих по трещинам горных пород, такими природными сорбентами, как гидроксид железа и глинистые минералы.

Среди 16 основных минеральных видов оксидов и гидроксидов железа наивысшую адсорбционную активность продемонстрировал ферригидрит [5]. Ферригидрит ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) - оксигидроксид трехвалентного железа, который существует исключительно в виде слабо окристаллизованных (или “аморфных”) наноразмерных кристаллов (2—6 нм) и агрегатов из них [5]. Ферригидрит как новый минеральный вид был описан Чухровым только в 1973 году [6], и его до сих пор ошибочно называют “аморфным оксидом железа” или “гидратированным оксидом железа” [5].

Ферригидрит (Фг) образуется в результате растворения и последующего окисления Fe-содержащих минералов и является продуктом геохимических преобразований в зоне гипергенеза. Фг является термодинамически нестабильным

минералом и претерпевает естественную трансформацию (старение) в более устойчивый гетит или гематит [5—7]. Высокая удельная площадь поверхности, превосходная сорбционная способность и низкая стоимость позволяет рассматривать ферригидрит в качестве перспективного адсорбционного материала.

Ферригидрит может быть легко синтезирован в лабораторных условиях в виде коллоидного раствора или в виде ультрадисперсных частиц - после низкотемпературной сушки [5, 7]. Однако, в таком виде Фг малопригоден для практического применения в качестве адсорбента в связи с трудностью отделения его от очищенного раствора [8].

Была предложена новая технология получения композитных сорбционных материалов путем контролируемого *in situ* осаждения Фг на/в твердые матрицы, в качестве которых были использованы как неорганические, так и полимерные матрицы [9, 10].

Композитный адсорбент на основе песка, покрытого гидроксидом железа (П-ГОЖ), был использован для выделения Sr-90 из модельных жидких радиоактивных отходов, имитирующих ЖРО из канистр Ханфордской ядерной резервации. Модельные ЖРО имели щелочной pH, высокий солевой фон, а также высокие концентрации натрия - (5,5 моль/дм³) и нитрат-ионов (3,7 моль/дм³) [11]. В работе было показано, что композитный адсорбент на основе П-ГОЖ способен селективно извлекать Sr-90 даже при наличии конкурирующих ионов Ca²⁺, Al³⁺ и Cr³⁺.

В другой работе сравнили адсорбционную способность по отношению к Sr-90 природного монтмориллонита Черкасского месторождения и монтмориллонита, покрытого гидроксидом железа (III) [12]. Было показано, что наличие гидроксида железа на поверхности монтмориллонита приводит к повышению адсорбции Sr-90 в широкой области pH.

К сожалению, во многих работах по синтезу и использованию композитных адсорбентов с осажденной фазой гидроксида железа не проводили минералогическую диагностику осажденной фазы. Между тем, этот вопрос заслуживает внимания в связи с тем, что, ферригидрит, например, как метастабильный минерал, может трансформироваться в более стабильный гетит и/или гематит, и большой научный интерес вызывают вопросы, связанные с дальнейшим поведением осажденного загрязнителя [5,6].

Целью данного исследования был синтез композитного адсорбента на основе ферригидрита, осажденного на поверхность модифицированных полипропиленовых волокон, а также исследование процесса сорбции стронция из модельных растворов на синтезированный адсорбент.

Методика эксперимента

Синтез композитных волокон. В качестве по-

лимерной основы для синтеза композитных адсорбентов на основе ферригидрита использовали модифицированные полипропиленовые волокна (ППВ) с привитыми цепями полиакриловой кислоты (ПАК) [13, 14]. ППВ с привитыми цепями ПАК помещали в раствор FeCl₃ на 12 ч; затем их промывали в дистиллированной воде и опускали в раствор NaOH (pH 8—9) на 10 минут для осаждения коллоидных частиц гидроксида железа (ГОЖ). Волокна с осажденным слоем ГОЖ тщательно промывали в бидистиллированной воде для удаления ионов натрия и хлора и сушили при 60 °С в течение суток.

Исследование морфологии волокон до и после синтеза проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) марки JEOL JSM-6490LV. Рентгеновские исследования проводили на дифрактометре ДРОН-3 в Cu-K_α - излучении. Съемка велась при комнатной температуре в интервале углов 2θ от 10 до 90 градусов в режиме пошагового сканирования.

Устойчивость композитных волокон в водных растворах с разными значениями pH определяли, помещая навеску синтезированных волокон (0,1 г) в колбу с 10 см³ раствора. После требуемого времени контакта раствор отфильтровывали и определяли в нем содержание железа с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра (модель AA-8500, Nippon Jarrell Ash Co Ltd., Япония).

Адсорбция ионов стронция. Изучение процесса адсорбции ионов стронция на синтезированные композитные волокна проводили в статических условиях. Исходные растворы готовили с использованием соли хлорида стронция (SrCl₂·6H₂O, Duksan Pure Chemicals Co.). В серию пробирок помещали волокна (0,1 г), заливали их 15 см³ раствора с начальной концентрацией C₀ и выдерживали требуемое время. После адсорбции раствор отделяли от волокон фильтрованием через стеклянный фильтр и определяли в нем концентрацию Sr с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра.

Количество адсорбированного Sr, A_{Sr} (мг/г), рассчитывали по формуле:

$$A_{Sr} = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{W} \quad (1)$$

где C₀ и C_t — начальная и конечная концентрации стронция в исследуемом растворе, мг/дм³, V — объем раствора, дм³ и W — вес адсорбента, г.

Эффективность извлечения стронция из раствора, E_{Sr} (%), определяли в условиях равновесия по формуле:

$$E_{Sr} = \frac{C_0 - C_p}{C_0} \cdot 100 \quad (2)$$

где C_p - равновесная концентрация стронция в растворе.

Все используемые реагенты были марки “ХЧ” или “ОСЧ”. Для приготовления растворов использовали дистиллированную воду, а pH растворов регулировали добавлением нескольких капель NaOH или HCl.

В экспериментах по десорбции волокна с известным количеством адсорбированного стронция промывали в дистиллированной воде и помещали в колбу с 20 см³ десорбирующего раствора. Концентрацию десорбированного Sr в растворе определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра.

Результаты и обсуждение

Как природный, так и синтетический ферригидрит формируется в виде нанокристаллов с размерами 2—6 нм. По количеству пиков на рентгеновской дифрактограмме выделяют две модификации ферригидрита — 2-линейчатый и 6-линейчатый. На рентгеновской дифрактограмме 2-линейчатого ферригидрита (two-line ferrihydrite, 2LFh) проявляется 2 широких пика, а в рентгеновской дифрактограмме 6-линейчатого ферригидрита (six-line ferrihydrite, 6LFh) — 6 широких пиков. Уширенные рентгеновские пики указывают на очень малый размер частиц и/или низкий структурный порядок (“аморфность”). Исследования Фг под просвечивающим электронным микроскопом выявили отдельные сферические частицы с размерами 2—4 нм для 2-линейчатого и 5—6 нм — для 6-линейчатого ферригидрита [5, 7]. Было выяснено, что по структуре две модификации ферригидрита практически идентичны и отличаются лишь по размеру частиц [15].

Быстрый гидролиз раствора соли Fe (III) при низком значении pH и повышенной температуре (~80 °C) приводит к образованию 6-линейчатого Фг, в то время как быстрое повышение pH раствора соли Fe(III) до 7—9 при комнатной температуре приводит к образованию 2-линейчатого Фг [3, 5, 15].

В данной работе в качестве основы для синтеза композитного адсорбента были выбраны полипропиленовые волокна с привитыми цепями полиакриловой кислоты. Выбор основы был обусловлен тем, что полипропиленовые волокна имеют прекрасные физико-химические свойства (низкая плотность — 0,91—0,92 г/см³, эластичность, устойчивость к двойным изгибам, высокая стойкость к действию кислот, щелочей, органических растворителей, нетоксичность). Прививочная полимеризация позволила ковалентно закрепить на поверхности волокон полиакриловые цепи с катионно-обменными функциональными группами, которые служили прекурсорами и стабилизаторами коллоидных частиц гидроксида железа, осаждаемых на поверхность волокон.

Эксперименты по осаждению коллоидных частиц гидроксида железа на поверхность волокон осуществляли при условиях, близких к синтезу 2-линейчатого ферригидрита — при pH 8—9 с последующей низкотемпературной сушкой композитных волокон [5, 7].

Исходные полипропиленовые волокна и волокна после прививочной полимеризации акриловой кислоты имели белый цвет и гладкую текстуру (рис. 1 а, б). После реакции привитых волокон в растворе соли Fe(III) и осаждения ГОЖ их цвет изменился на рыже-коричневый. На СЭМ изображениях композитных волокон (рис. 1 в, г) видно, что гидроксид железа, осажденный на поверхность волокон, образует равномерный слой, состоящий из плотно прилегающих друг к другу наноагрегатов (30—40 нм). Результаты микроанализа слоя, осажденного на поверхность композитных волокон, показали наличие в нем основных элементов гидроксида железа — Fe и O и отсутствие элементов полипропиленовой матрицы волокна — C и H.

На рис. 2 представлены дифрактограммы полипропиленовых (1) и композитных волокон с осажденным слоем ГОЖ (2). Рентгеновский спектр исходных полипропиленовых волокон показывает пики при $2\theta = 14^\circ, 17^\circ, 18.6^\circ, 21.5^\circ, 22^\circ$, которые отвечают основным рефлексам α -фазы полипропилена - (110), (040), (130), (111), (041), соответственно. Для синтеза композитных волокон были выбраны привитые волокна со средними значениями прививочной полимеризации (150—200%). В работе [16] было показано, что степень кристалличности полипропиленовой матрицы уменьшается с увеличением прививочной полимеризации.

На дифрактограмме композитных волокон с осажденным слоем ГОЖ (2) можно видеть появление двух новых широких пиков с центрами при $2\theta \sim 35^\circ$ и 62° . Положение максимумов на дифрактограмме и соотношение интенсивностей этих пиков практически идентичны данным, опубликованным для природных и синтетических образцов 2-линейчатого ферригидрита [5, 7, 15, 17]. Таким образом, полученные результаты позволяют констатировать, что гидроксид железа, осажденный на поверхности композитных волокон, представляет собой 2-линейчатый ферригидрит.

Была исследована устойчивость композитных волокон с осажденным слоем ферригидрита в водных растворах с разными значениями pH. Результаты, представленные в таблице 1, свидетельствуют, что композитные волокна устойчивы как в щелочных, так и кислых средах длительное время.

Наибольшее растворение осажденного слоя происходит в кислой среде. Однако, даже при pH 2 после 42 дней контакта в растворе оказалось менее 2 % железа, осажденного на волокна в виде ферригидрита.

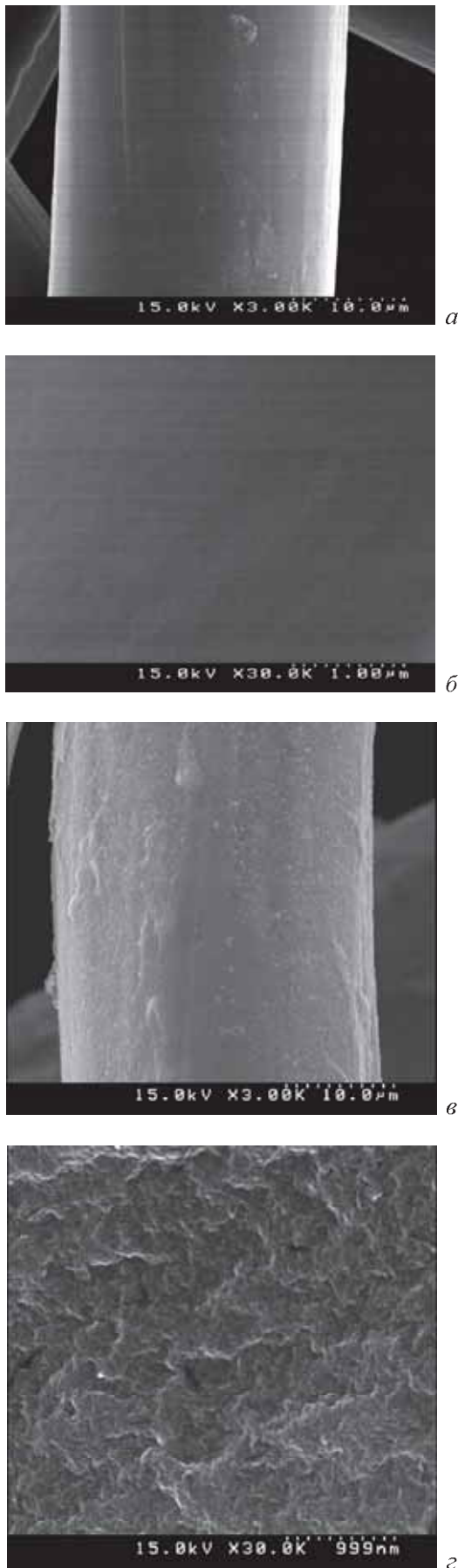


Рис. 1. СЭМ-изображения: (а,б) — полипропиленовых волокон с привитыми цепями ПАК (степень прививки 171%); (в, г) - композитных волокон с осажденным слоем гидроксида железа

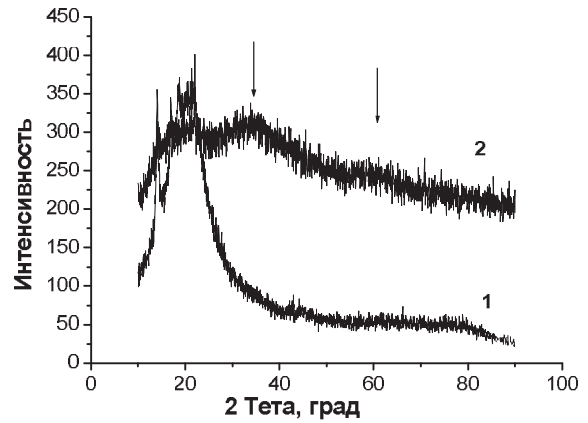


Рис. 2. Дифрактограммы полипропиленовых (1) и композитных волокон с осажденным слоем гидроксида железа (2)

Синтезированные волокна были апробированы в качестве адсорбента для выделения стронция из модельных растворов.

Основными функциональными группами, определяющими сорбционную активность ферригидрита, являются амфотерные гидроксильные группы. Полагают, что адсорбция из раствора на поверхность ферригидрита происходит за счет обмена с протонами. В зависимости от pH раствора гидроксильные группы реагируют или как кислота, или как основание, что проявляется в pH-зависимой сорбции.

Нами была исследована сорбция Sr из растворов хлорида стронция при разных значениях pH. Результаты, представленные на рис.3, показывают pH-зависимую сорбцию - с увеличением pH раствора от 3,0 до 9,2 происходит увеличение адсорбции Sr на композитные волокна от 0,23 до 1,13 ммоль/г, соответственно. Полученные результаты можно объяснить тем, что ниже pH точки нулевого заряда (pH_{ТНЗ}), которая для ферригидрита близка к 8,0 [5], его поверхность заряжена положительно. Поэтому при низких значениях pH практически не происходит адсорбции положительно заряженных ионов стронция на ферригидрит.

Таблица 1. Устойчивость композитных волокон с осажденным слоем ферригидрита в водных растворах при разных значениях pH

pH	Время контакта, день	Концентрация железа в растворе, мг/ дм ³
2,8	1	0,9
2,0	42	9,0
5,1	1	0,6
8,3	1	0,3
10,05	1	0,1
10,2	42	0,3

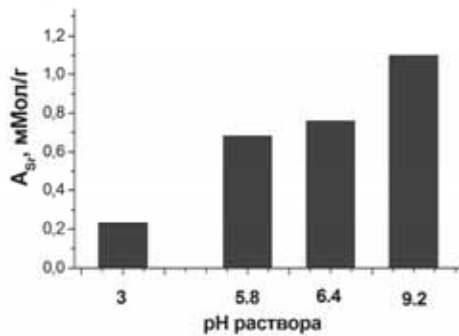


Рис. 3. Зависимость адсорбции стронция на композитные волокна от pH раствора.

$C_0=8,2$ ммоль/дм³; время сорбции — 24 ч

С повышением pH на его поверхности появляются нейтральные и отрицательно заряженные группы, что приводит к постепенному повышению адсорбции. Выше pH_{ТНЗ} наблюдается резкое увеличение адсорбции стронция синтезированными волокнами.

Результаты исследования сорбции Sr на синтезированные композитные волокна от времени представлены на рис. 4. Можно видеть, что в течение первых 90 минут было адсорбировано около 90% Sr. Однако процесс сорбции, хотя и со значительно меньшей скоростью, продолжался в последующие пять дней исследования (время достижения равновесия) и максимальное значение адсорбции составило 1,25 ммоль/г.

Двухстадийный характер кинетики адсорбции Sr, Cd, Zn, Ni, Pb, Cu, а также фосфат- и арсенат-ионов наблюдали при использовании свежесаженого или высушенного сублимацией “гидратированного оксида железа” (ферригидрита) [18]. В связи с тем, что наночастицы “гидратированного оксида железа”, как правило, образуют микроагрегаты со значительной внутренней пористостью, полагают, что стадия быстрой адсорбции происходит на поверхности агрегатов, а последующая медленная стадия связана с диффузией в поры (межзерновые каналы) агрегатов и адсорбцией на внутренних поверхностях наночастиц [18, 19].

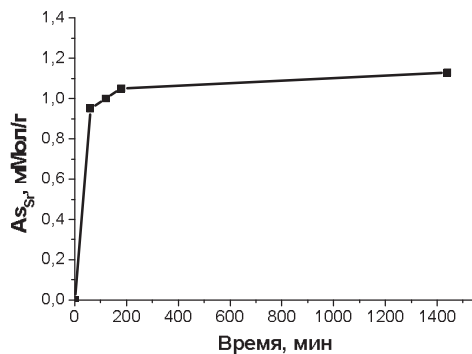


Рис. 4. Зависимость адсорбции стронция на композитные волокна от времени.

$C_0=8,2$ ммоль/дм³, pH ~ 9.

Результаты исследования адсорбции Sr из щелочных растворов (pH ≈ 8,5-9,0) на композитные волокна показали, что адсорбция зависит от начальной концентрации стронция в растворе (рис. 5). В исследованном диапазоне начальных концентраций (1,3 — 6,7 ммоль/дм³) A_{Sr} линейно увеличивается от 0,2 до 0,97 ммоль/г. При этом, с увеличением начальной концентрации происходит уменьшение эффективности адсорбции. Так, при $C_0=1,3$ ммоль/дм³ эффективность адсорбции составляет 99,9%; при $C_0=5,3$ ммоль/дм³ — $\alpha = 98,1\%$, а при $C_0=6,7$ ммоль/дм³ — $\alpha=96,7\%$.

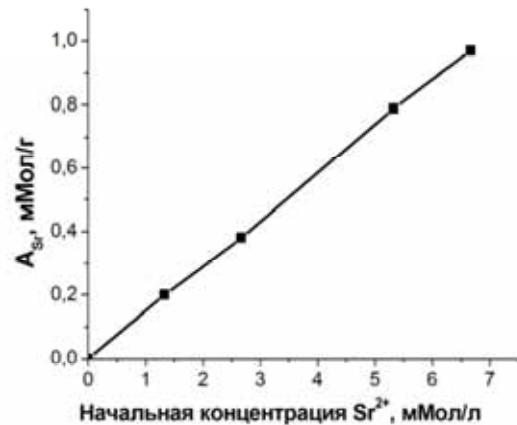


Рис. 5. Зависимость адсорбции от начальной концентрации стронция в растворе.

pH=8,5-9,0; время сорбции 5 дней; температура 23 °С; при периодическом встряхивании раствора.

Было также найдено, что при увеличении концентрации фонового электролита NaNO₃ от 0,01 до 0,5 моль/дм³ (pH ≈ 7,5—8,0) адсорбция стронция практически не изменялась, что свидетельствует о химическом взаимодействии между адсорбентом и ионами Sr. Полученные результаты также указывают, что ионы натрия не являются конкурирующими при сорбции Sr на ферригидрит и не оказывают влияния на сорбционный процесс.

Конкурирующими при сорбции ионов стронция будут, по-видимому, ионы кальция и магния, имеющие близкие (гео)химические свойства. Проведенные нами исследования показали, что кальций подавляет сорбцию стронция (рис.6) — с увеличением содержания кальция в растворе происходит быстрое уменьшение A_{Sr} . При равном соотношении ионов Sr и Ca адсорбция стронция практически не происходит.

Похожие результаты были получены при изучении сорбции стронция природным монтмориллонитом, покрытым гидроксидом железа [12].

В работе [11] обсуждали сложности выделения Sr-90 из ЖРО в присутствии ионов Mg и Ca, концентрация которых превосходит концентрацию Sr. Конкурирующие Ca и Mg значительно подавляли адсорбцию стронция на глинах, фельдшпатоидах, а также силикотитанатах.

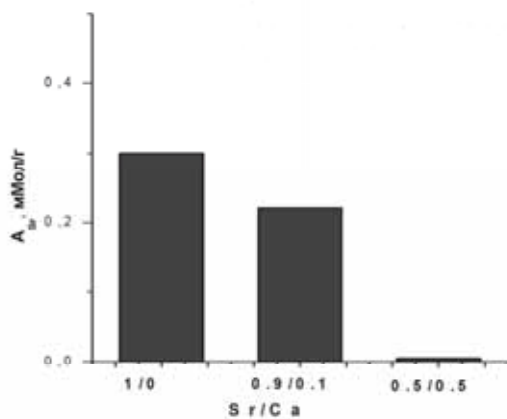


Рис. 6. Влияние концентрации ионов Ca на адсорбцию Sr на композитные волокна. рН = 6,8-7,0; $C_0 = 2,8$ ммол/дм³; время сорбции — 50 ч.

Однако песок с осажденным гидроксидом железа показал способность селективно извлекать стронций в присутствии ионов кальция, алюминия и хрома. Несмотря на то, что адсорбент на основе П-ГОЖ показал невысокую емкость по отношению к Sr, в работе были отмечены такие его преимущества как невысокая стоимость, доступные и нетоксичные материалы для синтеза, возможность регенерации и повторного использования. В этой же работе было исследовано влияние этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) на сорбцию Sr и Ca, а также устойчивость П-ГОЖ адсорбента в присутствии ЭДТА. Исследователи нашли, что ЭДТА в первую очередь связывает ионы кальция, оставляя ионы стронция в растворе, что позволяет рассматривать перспективность использования адсорбентов на основе гидроксида железа для выделения Sr-90 из ЖРО путем предварительного связывания ионов кальция с ЭДТА.

Для проведения процесса преконцентрирования ионов стронция и повторного использования композитных волокон была исследована десорбция Sr с помощью дистиллированной воды, растворов 0,5 моль/дм³ ацетата натрия и 0,1 моль/дм³ соляной кислоты. Как следует из таблицы 2, ни вода, ни ацетат натрия не являются эффективными десорбентами, что указывает на образование прочных химических связей между композитными волокнами с осажденным слоем ферригидрита и ионами стронция. Интересным фактом, который требует дополнительных исследований, является то, что эффективность десорбции в растворе ацетата натрия уменьшается с увеличением времени сорбции Sr на синтезированные композитные волокна. Так, из волокон, на которых произошла сорбция Sr в течение 1 часа, в растворе ацетата натрия десорбировалось около 20%, а из волокон со временем сорбции 163 часа десорбировалось всего 2% адсорбированного стронция. При десор-

бции с помощью раствора соляной кислоты происходит полная десорбция адсорбированного Sr. Таким способом, раствор соляной кислоты позволяет полностью десорбировать стронций без разрушения композитного адсорбента и в последующем использовать его повторно.

Таблица 2. Десорбция Sr с помощью дистиллированной воды, растворов ацетата натрия и соляной кислоты

Композитные волокна (время сорбции Sr, ч)	Десорбент	Десорбция, %
4	Дистиллированная вода	0
	Ацетат натрия, моль/дм ³	
1	0,5	20
2	0,5	17
3	0,5	15
6	0,5	11
163	0,5	2
	HCl, моль/дм ³	
9	0,1	100
163	0,1	100

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

синтезированы новые композитные волокна с осажденным слоем ферригидрита путем *in situ* формирования слоя на поверхности модифицированных полипропиленовых волокон. Рентгеновские исследования позволили диагностировать осажденный слой как 2-линейчатый ферригидрит. Электронно-микроскопические исследования показали, что ферригидрит образует на поверхности волокон равномерный слой, состоящий из плотно прилегающих друг к другу наноагрегатов (30—40 нм);

композитные волокна продемонстрировали высокую химическую устойчивость как в кислых, так и щелочных растворах;

композитные волокна, апробированные в качестве адсорбента для ионов стронция, показали рН-зависимую адсорбцию с наивысшими значениями в щелочной области. Двухстадийный характер сорбции Sr предполагает, что стадия быстрой сорбции происходит на поверхности наночастиц, а последующая медленная стадия связана с диффузией в поры (межзерновые каналы) агрегатов и адсорбцией на внутренних поверхностях наночастиц;

адсорбция стронция возрастает с увеличением начальной концентрации стронция в растворе,

а присутствие ионов кальция в растворе подавляет сорбцию Sr на композитный адсорбент;

ни вода, ни раствор ацетата натрия не являются эффективными десорбентами, что указывает на образование прочных химических связей между композитными волокнами с осажденным слоем ферригидрита и ионами стронция. Эффективность десорбции в растворе ацетата натрия уменьшается с увеличением времени сорбции Sr на синтезированные композитные волокна. Полная десорбция

Sr происходит в растворе 0,1 моль/дм³ HCl, что позволяет регенерировать адсорбент и повторно его использовать.

Положительными характеристиками синтезированного композитного адсорбента являются невысокая стоимость, доступные и нетоксичные материалы для синтеза, возможность регенерации и повторного использования, перспективность использования для очистки больших объемов загрязненных растворов.

Список использованной литературы

1. Кузнецов В. А. Формы нахождения стронция-90 и цезия-137 на железистых гипергенных минералообразованиях / В. А. Кузнецов, В. А. Генералова, В. П. Кольненьков // Докл. Акад. наук Беларуси. — 1993. — Т. 37. № 2. — С. 201—205
2. Кузнецов В. А. Распределение ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs по формам нахождения и оценка их селективных свойств. / В. А. Кузнецов, В. П. Кольненьков, В. А. Генералова. // Геохимия. — 1993. — № 10. — С. 1495—1499.
3. Кузнецов В. А. Исследование сорбционных свойств гидроксидов железа, марганца, титана, алюминия и кремния по отношению к ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs // Радиохимия. — 2000. — Т. 42, № 2. — С. 154—157.
4. Дрожко Е. Г. Задержка радионуклидов твердой фазой геологического массива вблизи озера Карачай. / Е. Г. Дрожко, И. А. Иванов, Л. М. Самсонова, Б. Г. Самсонов, В. И. Малышев, А. Е. Бахур, Ю. П. Салмин, Л. А. Березина // Вопросы радиационной безопасности. — 1996. — № 2. — С. 22-27.
5. Cornell R. M. and Schwertmann U. The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrences and uses. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., 2003. — 664 p.
6. Чухров Ф. В. О ферригидрите. / Ф. В. Чухров, Б. Б. Звягин, А. И. Горшков, Л. П. Ермилова, В. В. Балашова // Изв. АН СССР, сер. геол. — 1973. — № 4. — С. 23-33.
7. Schwertmann U., Cornell R.M. Iron Oxides in the Laboratory: Preparation and Characterization. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2000. — 188 p.
8. Shibata E. Froth Separation of Ferrihydrate Slurry Using Microbubbles with Ultrasonic Irradiation. / Shibata E., Saito S., Nakamura T. // Materials Transactions. — 2008. — V. 49. — № 7. — P. 1681 — 1687.
9. Gao Y. A new hybrid inorganic sorbent for heavy metals removal // Water Res. — 1995. — V. 29. — № 9. — P. 2195-2205.
10. Pan B.J. Development of polymeric and polymer-based hybrid adsorbents for pollutants removal from waters (review). / Pan B. J., Pan B. C., Zhang W. M., Lv Lu., Zhang Q.X., Zheng S.R. // Chem. Engineer.J. — 2009. — V. 151. — № 1. — P. 19-29.
11. Hansen B. Q., Use of iron oxide-coated sand to remove strontium from simulated Hanford tank wastes / Hansen B. Q., Kwan P., Benjamin M.M., Li C.W., Korshin G.V. // Environ. Sci. Technol. — 2001. — V. 35. — P. 4905-4909.
12. Кобец С. А. Влияние осажденных на поверхности монтмориллонита гидроксидов железа на сорбцию ⁹⁰Sr. / С. А. Кобец, В. Я. Демченко, Г. Н. Пшинко // Ядерні та радіаційні технології. 2007. — Т. 7. — № 3-4. — С. 72-78.
13. Бондарь Ю. В., Хан Д. Х. Оптимизация условий радиационно-химического синтеза полипропиленовых волокон с карбоксильными группами // Доповіді НАН України. — 2012. — № 9. — С. 111-117.
14. Бондарь Ю. В. Синтез новых композитных волокон с осажденным слоем ферригидрита // Доповіді НАН України. — 2015. — № 9. — С.
15. Michel F. M. Similarities in 2- and 6-Line Ferrihydrate Based on Pair Distribution Function Analysis of X-ray Total Scattering. / Michel F. M., Ehm L., Liu G., Han W. Q., Antao X S. M., Chupas P. J., Lee P. L., Knorr K., Eulert H., Kim J., Grey C. P., Celestian A. J., Gillow O J., Schoonen M. A. A., Strongin D. R., Parise J.B // Chem. Mater. — 2007. — V. 19, № 6. — P. 1489—1496.
16. Пригожаева Л. М. Термическое окисление волокнистого карбоксильного катионита на основе полипропилена с привитой акриловой кислотой. / Л. М. Пригожаева, Л. П. Круль, Е. А. Семенов, А. П. Поликарпов // Вестник БГУ. сер. 2. — 2011. — № 2. — С. 14-20.
17. Smith S.J., Page K., Kim H. Novel Synthesis and Structural Analysis of Ferrihydrate. / Gao Y.; SenGupta A. K.; Simpson D. // Inorg. Chem. — 2012. — V. 51. — № 5. — P. 6421-6424.
18. Hofmann A. Sorption kinetics of strontium in porous hydrous ferric oxide aggregates II. Comparison of experimental results and model predictions / Hofmann A., van Beinum W., Meeussen J.C.L., Kretschmar R. // J. Colloid Interface Sci. — 2005. — V. 283. — P. 29-40.
19. Axe L., Anderson P.R. Experimental and Theoretical Diffusivities of Cd and Sr in Hydrous Ferric Oxide // J. Colloid Interface Sci. — 1997. — V. 185. — P. 436-448.

Получено 18.08.2015