УДК 621.039.7:661.63:661.728

СОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА УРАНА И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТ РАДИОАКТИВНЫХ ПРИМЕСЕЙ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

© 2021 г. Д. А. Елатонцев^{а, *}, А. П. Мухачев⁶, Ю. Ф. Коровин^а, Н. Д. Волошин^а

^аДнепровский государственный технический университет, Каменское, Украина ^бИнститут геотехнической механики им. Н. С. Полякова НАН Украины, Днепр, Украина *e-mail: ya.nah2015@yandex.com

Получена 24.03.2020, после доработки 06.06.2020, принята к публикации 16.06.2020

Исследован процесс сорбционного разделения урана и РЗЭ после кислотного выщелачивания уранфосфор-редкоземельного химконцентрата модифицированным гранулированным сорбентом на основе фосфата целлюлозы (МГФЦ). Установлено, что МГФЦ эффективно поглощает U(VI) из раствора, при этом РЗЭ остаются вместе с фосфором и фтором в рафинате. Определены зависимости обменной емкости МГФЦ для U(VI) и РЗЭ от объема пропущенного фильтрата. Динамическая емкость сорбента по U(VI) достигает 100 мг/г, степень извлечения U(VI) из раствора превышает 94%. Показано, что десорбцию урана целесообразно проводить раствором (NH₄)₂CO₃ при температуре 50 ± 2°C с предварительным окислением U(IV) до U(VI) непосредственно на сорбенте 0.5%-ным раствором HNO₃ с добавлением 2% NaNO₂. Сорбционное извлечение U(VI) на МГФЦ позволяет исключить стадию экстракционной очистки от РЗЭ при производстве закиси-окиси урана. Выявлена возможность сорбционного отделения РЗЭ от радиоактивных изотопов на МГФЦ, емкость сорбента по РЗЭ составляет 70 мг/г.

Ключевые слова: сорбция, обменная емкость, фосфат целлюлозы, U(VI), редкоземельные элементы, азотная кислота, выщелачивание, сорбент.

DOI: 10.31857/S0033831121040110

Одним из основных источников для производства урана являются сложноминеральные руды, содержащие фосфаты, РЗЭ, скандий, торий и радиоактивные элементы – ²²⁸Ra, ²²⁸Ac и ²³²Th. К таким рудам относятся концентрат «Меловое» (Казахстан) и фосфориты Новополтавского месторождения (Украина). Главным условием переработки сырья такого типа является очистка урана от РЗЭ и продуктов распада урана и тория до санитарных норм [1].

В промышленной практике отделение урана от РЗЭ и радиоактивных примесей было реализовано в процессе экстракционного разделения из азотно-фосфорнокислых сред, в ходе которого уран переходил в экстрагент (смесь трибутилфосфата (ТБФ) и ди(2-этилгексил)фосфорной кислоты (Д2ЭГФК)), а РЗЭ и радиоактивные продукты распада – в рафинат. РЗЭ после очистки от радиоактивных примесей направляли на получение концентратов и индивидуальных элементов [2, 3]. Недостатками этого процесса были сложность аппаратурного оформления и взрывопожароопасность производства.

Современные технологии извлечения урана из руд предусматривают сорбцию урана из пульп или растворов на ионообменных смолах [4]. Для получения концентрата закиси-окиси урана необходима дополнительная очистка элюатов урана от РЗЭ и радиоактивных примесей (экстракционная очистка, углеаммонийное высаливание и другие). Производство синтетических ионитов связано с рядом технологических, санитарных затруднений, требует расхода дефицитного сырья и реактивов [5]. Существует необходимость в разработке новых, более экономичных сорбентов для извлечения урана из растворов и пульп [6].

Ранее было установлено [7], что сорбент на основе ФЦ обладает избирательной сорбцией по урану из растворов выщелачивания руд с помощью серной и азотной кислот. При сорбции из растворов с содержанием урана 1.5–2.0 г/дм³ при рН 3 полная статическая обменная емкость (ПСОЕ) по U(VI) достигает 200 мг/г. Высокая химическая и механическая стойкость сорбентов на основе ФЦ позволяет проводить сорбцию урана из растворов и пульп при температуре до 70°С. Однако при использовании в качестве основы сорбента древесных опилок и хлопчатобумажных тканей сорбент имеет волокнистую, чрезмерно уплотняющуюся структуру, что не позволяет использовать его для работы в пульпах, требует разработки специальной сорбционной аппаратуры [8]. Поэтом, более целесообразно применять природные лигнин-целлюлозосодержащие материалы, обладающие отличными физическими свойствами, например, ореховую, абрикосовую, персиковую и другие виды скорлупы и косточек.

Созданный в Севастопольском государственном университете сорбент «Фолиокс» на основе ореховой скорлупы и фруктовых косточек был успешно испытан для доочистки конденсата установок СВО-3 и СВО-7, очистки радиоактивных сред низкой и средней активности от радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co [9, 10]. Результаты исследований показали перспективность применения сорбентов-ионообменников на основе растительных отходов. При использовании в качестве сырья грецкого ореха, абрикосовой и других косточек стоимость получения ионитов составит не более \$1/кг. Однако сорбция урана на ФЦ так и не получила промышленного применения.

В настоящей работе приведены результаты экспериментов по определению возможности сорбционного отделения урана от РЗЭ и РЗЭ от радиоактивных примесей с целью упрощения технологии и исключения стадии экстракции. Целью данной работы было изучение условий применения сорбента МГФЦ для выделения урана и РЗЭ из концентрата, содержащего фосфор и радиоактивные элементы, в динамических условиях.

РАДИОХИМИЯ том 63 № 4 2021

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводили на растворе после кислотного вскрытия коллективного уран-фосфор-редкоземельного химконцентрата, полученного при переработке фосфоритов месторождения «Меловое». Химический состав исходного концентрата, %: U 1.8–2.5, P3Э 11–13, P₂O₅ 11–13, CaO 5, F 2.7. Навеску химконцентрата распульповывали водой до T : $\mathcal{K} = 1 : 4$ и выщелачивали в течение 2 ч при температуре 65 ± 5°C с расходом азотной (серной) кислоты 45–50% к массе сухого концентрата. Фильтрат анализировали на содержание U, P3Э по стандартным методикам [11, 12] и направляли на сорбцию, кек – на доизвлечение скандия.

Сорбент типа ФЦ готовили следующим образом. Смесь скорлупы грецких орехов, косточки абрикоса и сливы механически измельчали до гранул размером 0.8-1.6 мм и обрабатывали 5%-ным водным раствором NaOH при температуре 90 ± 2°C в течение 4 ч. Полученную целлюлозу отмывали от щелочи водой до рН 7.0-7.5 и пропитывали рабочим раствором, состоящим из 20% H₃PO₄, 40% CO(NH₂)₂ и 40% Н₂О, при гидромодуле 1 : 2.5 и температуре 18-20°С в течение 6-10 ч. Модифицированную целлюлозу подвергали термической обработке при температуре 180 ± 2°С в течение 3-4 ч. Полученную массу с температурой 100-110°С обрабатывали водой с температурой 20-30°С в течение 1 ч. Сорбент отмывали дистиллированной водой и выдерживали в течение 6 сут в дистиллированной воде, после чего высушивали до постоянной массы при $100 \pm 3^{\circ}$ С. Основные структурно-сорбционные характеристики сорбента МГФЦ, определенные согласно ГОСТам 10900, 10896, 10898 и 17338, приведены в табл. 1. Расчет статической и динамической обменной емкости МГФЦ выполняли согласно ГОСТ 20255.

Содержание азота в МГФЦ определяли полумикрометодом Кьельдаля [13], содержание фосфора – озолением по Гинзбургу [13], содержание кислотных групп определяли методом потенциометрического титрования по стандартной методике [14].

Динамическую обменную емкость МГФЦ по урану и РЗЭ определяли согласно типовой методике [14]: в колонку загружали 150 г абсолютно сухого сорбента МГФЦ (диаметр колонки 40 мм, высота слоя в колонке 50 см) и пропускали определенное

Характеристика	Показатель			
Внешний вид	Гранулы неправильной формы темно-коричневого			
	цвета			
Размер зерен, мм	0.8–2.5			
Массовая доля влаги, %	10.1			
Окисляемость фильтрата в пересчете на кислород, мг/г	0.94			
Степень набухания ($V_{\text{наб}}/V_{\text{сух}}$)	1.85			
Удельный вес, г/см ³	1.25–1.30			
Насыпной вес сухого МГФЦ, г/см ³	0.70			
Насыпной вес влажного МГФЦ, г/см ³	0.38			
Полная статическая обменная емкость ^а по урану(VI), мг/г	175			
Осмотическая стабильность, %	98			

^а Из химически-чистого раствора уранилсульфата с концентрацией U(VI) 2 г/дм³ и времени концентрирования 4 сут.

количество восстановленного раствора с известным содержанием урана и РЗЭ. На выходе из колонки отбирали 50 см³ раствора и анализировали на остаточное содержание урана и РЗЭ. Скорость пропускания раствора через колонку составляла 1 дм³/ч, или 0.65 к.о./ч. После окончания сорбции МГФЦ отмывали водой от иона PO₄³⁻, полноту отмывки контролировали качественной реакцией с молибдатом аммония [15].

Десорбцию урана и регенерацию сорбента проводили в следующем порядке:

 Отмывка насыщенного сорбента от пульпы водой – 1.5–2.0 об/об сорбента.

– Окисление U(IV) до U(VI) на МГФЦ при добавлении раствора 0.5% HNO₃ с добавкой 2% NaNO₂.

– Десорбция урана и РЗЭ 5%-ным раствором $(NH_4)_2CO_3$ в количестве 0.8–1.0 об/об сорбента; $T = 50 \pm 1^{\circ}C$, $\tau = 60$ мин.

 Отмывка сорбента от водорастворимого урана и карбоната аммония дистиллированной водой – 0.8–1.0 об/об сорбента.

– Регенерация сорбента 20%-ным раствором H_2SO_4 – 0.8–1.0 об/об сорбента; T = 30-40 °C, $\tau = 30-40$ мин.

Десорбцию проводили до содержания урана в сорбенте 1 мг/г. С целью уменьшения содержания Р и Fe карбонатный регенерат нейтрализовался азотной кислотой до pH 2–3. Осадок отфильтровывали, а из фильтрата осаждали диуранат аммония. Фосфорный осадок прокаливали при $800 \pm 10^{\circ}$ С и определяли химический состав по стандартным методикам [11, 12]. С целью устранения отрицательного влияния Fe³⁺ на процесс сорбции проводили восстановление Fe³⁺ \rightarrow Fe²⁺ раствором гидросульфита натрия. Полноту восстановления Fe³⁺ \rightarrow Fe²⁺ проверяли по отсутствию трехвалентного железа качественной реакцией с сульфосалициловой кислотой [15].

Для измерения активности изотопов ²²⁸Ra, ²²⁸Ac и ²³²Th в растворе после выщелачивания и в закиси-окиси урана применяли гамма-спектрометрическую систему InSpector 1000 со сцинтилляционным детектором (NaI) с использованием программного обеспечения ISOCS (In Situ Object Counting System). Погрешность измерений составляла $\pm 5\%$. В исследовании использовали химические реактивы марки ч.д.а.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате вскрытия уран-фосфор-редкоземельного химконцентрата азотной кислотой был получен раствор с содержанием урана $3.5-5.5 \text{ г/дм}^3$, P3 \rightarrow 20–25 г/дм³, Fe³⁺ 7 г/дм³, P₂O₅ 60 г/дм³, Th 0.1% и избыточной кислотностью 100–120 г/дм³. Выход кека составлял 30–40% от исходной массы, содержание урана – 0.09–0.14%. РЗ \rightarrow в сбросном кеке обнаружены не были. Полученный после вскрытия раствор содержал до 7 г/дм³ Fe³⁺, что затрудняло сорбцию урана. Суммарная активность раствора составляла 11×10^3 Бк/дм³ (3×10^{-7} Ки/дм³).

При вскрытии по сернокислому варианту был получен раствор с содержанием урана 3.5–5.5 г/дм³, РЗЭ 10–15 г/дм³ при избыточной кислотности 100– 150 г/дм³. Выход кека составлял 25–30% от исходной массы, содержание урана – 0.028–0.033%. Содержание РЗЭ в остатке после вскрытия составляло 18–30%. Поэтому для исследований был выбран азотнокислотный вариант.

В процессе синтеза МГФЦ по вышеописанной методике лигноцеллюлозное сырье претерпевало два основных воздействия: удаление лигниновой и гемицеллюлозной составляющей при обработке раствором NaOH (мерсеризацию) и химическое модифицирование целлюлозной составляющей при взаимодействии с рабочим раствором (фосфорилирование). Элементный анализ МГФЦ показал содержание фосфора 15.3%, азота - 7.17%. Ранее было установлено [16], что в результате фосфорилирования гидроксилсодержащих полимеров смесью фосфорной кислоты и карбамида получают фосфорсодержащие катиониты с фосфатными функциональными группами типа ОРО(ОН)2. Это позволяет предположить присутствие групп такого типа в структуре МГФЦ. Кроме того, возможно наличие азотосодержащих групп: амидных CONH₂ и имидных CONHCO. Таким образом, МГФЦ является слабокислотным катионитом с суммарным содержанием кислотных групп 4.03 мг-экв/г.

Статическая емкость МГФЦ по урану(VI) из раствора после выщелачивания азотной кислотой с концентрацией U(VI) 4.8 г/дм³, РЗЭ 20 г/дм³ и времени концентрирования 24 ч составила 75 мг/г, содержание урана в рафинате РЗЭ – ≤1 мг/дм³. Это подтвердило хорошую селективность МГФЦ по отношению к урану в присутствии радиоактивных примесей и РЗЭ.

Кривые сорбции в динамических условиях приведены на рис. 1.

Из данных рис. 1 видно, что равновесная концентрация по РЗЭ наступает при 70–75% от равновесной концентрации по урану. Резкое снижение концентрации урана в растворе при пропускании 1 к.о. фильтрата, по-видимому, объясняется сорбцией урана на МГФЦ. После насыщения обменной

РАДИОХИМИЯ том 63 № 4 2021



Рис. 1. Зависимость концентрации от объема пропущенного через колонку восстановленного раствора (фильтрата): *1* – U(VI), г/дм³; *2* – РЗЭ(III), г/дм³.

емкости сорбента при дальнейшем пропускании фильтрата через колонку концентрация урана в нем начинает увеличиваться. По аналогичному принципу изменяется концентрация РЗЭ в фильтрате – на начальном этапе процесса РЗЭ сорбируются на МГФЦ вместе с ураном. В дальнейшем содержание РЗЭ в растворе увеличиваться по причине вымывания их из сорбента фильтратом.

При введении в азотнокислый раствор гидросульфита натрия одновременно с восстановлением $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$ шестивалентный уран переходил в четырехвалентное состояние:

$$2UO_2(NO_3)_2 + Na_2S_2O_4 + 4HNO_3 \rightarrow 2U(NO_3)_4 + Na_2SO_4 + 2H_2O + SO_2\uparrow.$$

Восстановленный раствор с содержанием U(IV) 4.8 г/дм³ и РЗЭ 20 г/дм³, пропускали через колонку, заполненную МГФЦ. После сорбции получены рафинаты с содержанием урана 1.2–2.0 г/дм³ и РЗЭ 16.5–21.0 г/дм³. При этом динамическая обменная емкость (ДОЕ) по урану находилась в пределах от 60 до 100 мг/г. Результаты опытов за одну стадию (после пропускания 1 к.о.) сорбции представлены в табл. 2.

Ранее было установлено [17], что при использовании в качестве элюента раствора карбоната аммония происходит избирательная десорбция урана с отделением от примесей алюминия и железа, частично сорбированных на целлюлозных ионообменниках. В настоящем исследовании остаточная емкость МГФЦ по урану после десорбции

Таблица 2. Среднее содержание урана(VI) и РЗЭ в растворе при выщелачивании химконцентрата азотной кислотой

Исходный раствор		Раствор после сорбции		
С _{U(VI)} , г/дм ³	С _{РЗЭ} , г/дм ³	С _{U(VI)} , г/дм ³	С _{РЗЭ} , г/дм ³	
4.6 ± 0.1	24.7 ± 0.1	1.8 ± 0.1	19.1 ± 0.1	

составила 1 мг/г, что подтвердило правильность выбора элюента. Десорбция U(IV) 5%-ным раствором карбоната аммония проходила в течение 8 ч, при этом полнота процесса составила 80%. Для интенсификации процесса проводили окисление урана 0.5%-ным раствором HNO₃ с добавкой NaNO₂. В результате продолжительность десорбции снизилась до 30 мин, содержание U(VI) в азотнокислом регенерате составило 0.036–0.12 г/дм³, РЗЭ – 1–3 г/дм³. Результаты опытов по десорбции урана приведены в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что окисление урана происходит удовлетворительно – в течение 30– 40 мин степень десорбции достигает 95%. Данные химического анализа карбонатного регенерата (%): U 72.83, P 1.10, V 0.02, Fe 0.22, Cu 0.0096, Na 0.0110, K 0.0380, Si 0.020, Al 0.003, P3Э не обнаружены.

В связи с повышенным содержанием P и Fe (1.1 и 0.22% соответственно) было опробовано двухстадийное осаждение концентрата путем карбонатного высаливания диураната аммония, полученного после отделения фосфатного осадка. Полученные кристаллы аммоний-уранилтрикарбоната прокаливали до закиси-окиси следующего состава, %: U 84.2, P 9.4 × 10⁻², V 0.01, Fe 1.9 × 10⁻², Cu 4.6 × 10⁻⁴, Na 0.003, K 0.006, Si 3.1 × 10⁻², Al 2.6 × 10⁻³, суммарная активность<1 Бк/г (<1 × 10⁻¹⁰ Ки/г), P3Э не обнаружены.

По данным анализа видно, что после углеаммонийного высаливания химического концентрата, осажденного из карбонатного регенерата, образу-



Рис. 2. Зависимость емкости МГФЦ по РЗЭ от концентрации РЗЭ в растворе.

ется закись-окись урана, отвечающая стандарту СТ РК 2573–2014 по всем примесям, кроме кремния. Вопрос о причине загрязнения продукции кремнием требует дальнейшего изучения.

Сорбент МГФЦ обладает высокой механической прочностью, осмотической стабильностью и селективностью по отношению к урану, что способствует сорбционному концентрированию урана после его кислотного выщелачивания из руд. Способность сорбента сорбировать уран из сильнокислотных сред расширяет области его применения. Восстановление U(VI) до U(IV) с помощью NaHSO₃ эффективно при кислотности ≥ 120 г/дм³, а при кислотности ≤ 100 г/дм³ уран выпадает в осадок. Окисление U(IV) смесью HNO₃ и NaNO₂ позволяет достичь 99%-ной десорбции образующегося U(VI) с МГФЦ. Десорбция урана карбонатом аммония обеспечивает остаточную емкость сорбента на уровне 1 ± 0.1 мг/г.

В результате опытов по сорбции РЗЭ на МГФЦ была определена емкость сорбента в зависимости от концентрации РЗЭ в растворе (рис. 2). Из раствора, содержащего 25 г/дм³ РЗЭ, емкость МГФЦ составляет 70 мг/г. Десорбция РЗЭ с помощью 5%-ного раствора (NH₄)₂CO₃ позволяет добиться отде-

Таблица 3. Среднее содержание урана(VI) в растворе при выщелачивании химконцентрата азотной кислотой

Раствор			Карбонатный регенерат			
V and	до сорбции	после сорбции	- <i>V</i> , см ³	144 5	Степень извлечения, %	
<i>V</i> , CM ²	т тицика, т	<i>т</i> _{U(VI)} , г		<i>v</i> , cm ²	<i>v</i> , cm ²	$m_{\rm U(VI)}, \Gamma$
2700	12.2 ± 0.1	4.3 ± 0.1	1500	7.4 ± 0.1	95.9 ± 0.1	



Рис. 3. Технологическая схема сорбционной переработки уран-фосфор-редкоземельного химконцентрата.

ления урана и тория от продукционного регенерата, который перерабатывается с получением концентратов легкой и среднетяжелой групп РЗЭ. Рафинат после сорбционного извлечения РЗЭ, урана и тория направляется на производство азотно-фосфорного удобрения нитрофос. Карбонатный раствор, содержащий уран, ²³²Th, ²²⁸Ra и ²²⁸Ac, направляется на захоронение.

Для восстановления обменной емкости МГФЦ предлагается проводить его регенерацию с использованием 20%-ной H₂SO₄ при 30–40°С в течении 1 ч. После регенерации насыщенного МГФЦ

РАДИОХИМИЯ том 63 № 4 2021

с содержанием РЗЭ 70 мг/г при скорости пропускания раствора H₂SO₄ через колонку 1 к.о./ч было достигнуто содержание РЗЭ в сорбенте 2 мг/г. Концентрация РЗЭ в регенерате составила 10 г/дм³. В дальнейшем он направлялся на осаждение концентрата РЗЭ аммиаком при рН 8–9.

Таким образом, на основании проведенных исследований определена возможность эффективного разделения урана и РЗЭ от примесей на сорбенте МГФЦ. Это позволило увеличить степень извлечения урана, а также предложить новую технологическую схему получения концентрата закиси-окиси урана (рис. 3).

Следует отметить, что сорбент МГФЦ в отличие от КУ-2-8 способен поглощать Fe, Ca и Ra из растворов. При этом обеспечивается очистка раствора от ²³²Th, ²²⁸Ra и ²²⁸Ac. В соответствии со схемой получают элюат состава, г/дм³: РЗЭ 10–20, P₂O₅ 4, Th 0.05, (Ca + Fe) < 1. Побочный продукт – рафинат (40–50 г/дм³ P₂O₅, \leq 1 г/дм³ РЗЭ, Th 0.05 г/дм³) утилизируется в производстве удобрения нитрофос.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы звявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Смирнов К.М., Молчанова Т.В., Крылова О.К.* // Горн. журн.. 2018. № 7. С. 59–63.
- Авдонин Г.И., Гуров В.А., Мамошин М.Ю., Пикалова В.С. // Разведка и охрана недр. 2017. № 12. С. 48–55.
- Смирнов К.М., Молчанова Т.В., Акимова И.Д., Крылова О.К. // Атом. энергия. 2018. Т. 124, № 2. С. 90–94.
- 4. *Молчанова Т.В., Смирнов К.М., Крылова О.К.* // Атом. энергия. 2019. Т. 126, № 4. С. 205–211.

- 5. *Кузин Р.Е., Брыкин С.Н., Таиров Т.Н.* // Тонкие хим. технологии. 2016. Т. 11, № 5. С. 21–25.
- 6. Смирнов К.М., Молчанова Т.В., Ананьев А.В. и др. // Атом. энергия. 2017. Т. 122, № 6. С. 309–314.
- Ласкорин Б.Н., Бабенко А.М., Филиппов Е.А., Трубников А.Ф. // Успехи химии. 1975. Т. 44, № 5. С. 761–781.
- 8. *Пирматов Э.А., Шодиев А.Н.У., Хасанов А.С. и др.* // Universum: технические науки. 2019. № 11-1 (68).
- 9. *Ерофеев В.А., Черкашина Н.И. //* Естественные и технические науки. 2019. № 3. С. 52–54.
- Стрелко В.В., Милютин В.В., Псарева Т.С. и др. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. 2016. Т. 26. С. 96–100.
- 11. *Рябчиков Д.И., Сенявин М.М.* Аналитическая химия урана. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 433 с.
- 12. Бусев А.И., Типцова В.Г., Иванов В.М. Руководство по аналитической химии редких элементов. М.: Химия, 1978. 432 с.
- 13. *Климова М.А.* Основные микрометоды анализа органических соединений. М.: Химия, 1975. 224 с.
- 14. Полянский Н.Г., Горбунов Г.В., Полянская Н.Л. Методы исследования ионитов. М.: Химия, 1976. 208 с.
- 15. *Лурье Ю.Ю.* // Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. 448 с.
- 16. *Хмылко Л.И., Орехова С.Е. //* Свиридовские чтения. 2012. Т. 8. С. 232–239.
- 17. Милютин В.В., Некрасова Н.А., Харитонов О.В. и др. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16, № 3. С. 313–322.