

## Сорбционное извлечение радионуклидов стронция из поверхностных вод природным алюмосиликатом

А.С. Кутергин<sup>1</sup> ✉, Т.А. Недобух<sup>1</sup>, А.Ф. Никифоров<sup>1</sup>,  
К.И. Зенкова<sup>2</sup>, Т.В. Тарасовских<sup>1</sup>

✉ andr.kutergin@mail.ru

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Екатеринбург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Загрязнение больших объемов поверхностных вод радионуклидами вызвано появлением значительного числа объектов, представляющих потенциальную радиационную опасность. Поиск и разработка доступных, экологически безопасных сорбентов для очистки таких вод – актуальная задача, решение которой позволит предложить эффективные мероприятия по очистке природных водоемов от загрязнений. В работе представлены результаты исследования сорбционного концентрирования радионуклида <sup>90</sup>Sr из водных растворов опытными образцами в статических и динамических условиях. **Методы.** Определен диапазон концентраций стронция, в пределах которого распределение извлекаемого компонента между твердой и жидкой фазами подчиняется закону Генри. Коэффициент распределения гранулированного сорбента в области Генри составил по стронцию  $K_d = (3,46 \pm 0,2) \cdot 10^2$  мл/г, что сопоставимо со значением  $K_d = 200$  мл/г исходного природного глауконита. Достигнутое значение статической обменной емкости по стронцию сорбента в диапазоне концентраций ( $10^{-5} - 1$ ) г/л составляет  $\geq 4,2$  мг/г. Исследование кинетики сорбции проводили в режиме рециркуляции. Представлены выходные кривые сорбции стронция разработанным сорбентом в динамическом режиме. Коэффициент распределения стронция составил не менее  $2,42 \cdot 10^3$  мл/г, что примерно в 10 раз превышает значение, полученное в статических условиях. После пропускания через колонку 900 к.о. модельного раствора уплотнения сорбента не наблюдалось, что подтверждает сохранение им гидродинамических характеристик и возможность использования в качестве загрузки фильтров в системах водоочистки. **Результаты.** Сорбент, полученный на основе доступного местного минерального сырья, пригоден и экономически выгоден для использования при очистке загрязненных <sup>90</sup>Sr водных объектов Уральского региона. Показана перспективность применения природного алюмосиликата – глауконита Каринского месторождения (Челябинская обл., Россия), гранулированного со связующим – водопроводной водой, в качестве сорбента для извлечения радионуклида стронция из природных вод при реабилитации радиационно загрязненных территорий.

© Кутергин А.С., Недобух Т.А., Никифоров А.Ф., Зенкова К.И., Тарасовских Т.В., 2021

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** очистка воды, радионуклиды, алюмосиликатный сорбент, гранулированный глауконит, природные воды, стронций.

**Для цитирования:** Кутергин А.С., Недобух Т.А., Никифоров А.Ф., Зенкова К.И., Тарасовских Т.В., Сорбционное извлечение радионуклидов стронция из поверхностных вод природным алюмосиликатом // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 118–134. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-7.

Дата поступления 09.02.2021.

## SORPTION EXTRACTION OF STRONTIUM RADIONUCLIDES FROM SURFACE WATER BY NATURAL ALUMINUM SILICATE

Andrey S. Kutergin<sup>1</sup>✉, Tatiana A. Nedobukh<sup>1</sup>, Aleksandr F. Nikiforov<sup>1</sup>,  
Ksenia I. Zenkova<sup>2</sup>, Taisiya V. Tarasovskikh<sup>1</sup>

✉ andr.kutergin@mail.ru

<sup>1</sup>FGAOU VO «Ural Federal University named after the First President of Russia  
B.N. Yeltsin», Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>FSBI «Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection  
of Water Resources», Yekaterinburg, Russia

### ABSTRACT

**Significance.** The contamination of large volumes of surface waters with radionuclides is caused by the appearance of a significant number of objects that pose a potential radiation hazard. The search and development of affordable, environmentally friendly sorbents for the purification of such waters is an urgent task, the solution of which will make it possible to propose effective measures for the purification of natural water bodies from pollution. The article presents the result of research of sorption reduction of <sup>90</sup>Sr radionuclide from aqueous solutions with experimental samples under static and dynamic conditions. **Methods.** We have defined the strontium concentration range within which the reduced component distribution between solid and liquid phases obeys Henry law. The granulated sorbent distribution index in the Henry area was  $K_a = (3.46 \pm 0.2) \cdot 10^2$  ml/g in terms of strontium and this is comparable with the  $K_a = 200$  ml/g value of the initial natural glauconite. The obtained value of the sorbent static exchange capacity in terms of strontium in the  $(10^{-5} - 1)$  g/l concentration range is  $\geq 4.2$  mg/g. We investigated the sorption kinetics in the recirculation mode. We have presented the output curves of the strontium sorption with the developed sorbent in the dynamic mode. The strontium distribution index was at least  $2.42 \cdot 10^3$  ml/g and this approximately 10 times exceeded the value obtained under the static conditions. After passing of 900 column volumes of the model solution through the column, no compacting of the sorbent was observed and this confirmed preserving of its hydro/dynamic characteristics and the possibility to use it as a filter loads in ant water treatment systems. **Results.** The sorbent produced from local mineral raw material is applicable and feasible for use in treatment of the Ural region water bodies contaminated with <sup>90</sup>Sr. We have demonstrated good perspective of the natural aluminum silicate glauconite of the Karinsk deposit (Chelyabinsk Oblast, Russia)

granulated with bonding tap water use as a sorbent for extraction of strontium radionuclide from natural waters in the process of radioactive-contaminated territories

**Keywords:** water purification, radionuclides, aluminum silicate sorbent, granulated glauconite, natural waters, static sorption modes, exchange capacity, strontium Henry law. The distribution index of the granulated sorbent within Henry.

**For citation:** Kutergin A.S., Nedobukh T.A., Nikiforov A.F., Zenkova K.I., Tarasovskikh T.V. Sorption Extraction of Strontium Radionuclides from Surface Water by Natural Aluminum Silicate. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 4. P. 118–134. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-7.

Received February 09, 2021

## ВВЕДЕНИЕ

В материалах Всемирной организации здравоохранения значительная роль в причинах заболеваемости населения отводится образу жизни, качеству среды обитания, наследственности и эффективности медико-санитарной помощи. Существенный вклад в уровень заболеваемости населения промышленно развитых регионов вносит загрязнение окружающей среды, при этом качество питьевой воды является одним из важнейших показателей, влияющих на здоровье человека.

Проблема очистки воды от радионуклидов приобрела актуальность в связи с появлением значительного количества представляющих потенциальную радиационную опасность объектов: атомные электростанции, горнохимические комбинаты, заводы по переработке ядерного топлива, хранилища радиоактивных отходов. Подвергшиеся радиоактивному воздействию территории загрязняют окружающую среду радионуклидами искусственного происхождения. Одним из наиболее распространенных и трудноудаляемых радионуклидов является стронций-90. Поступление стронция-90 в воду, почву и растения приводит к его миграции по цепям питания и, как следствие, попаданию в организм человека [1–3].

В последние годы одним из перспективных методов извлечения радиоактивных и токсичных металлов считается сорбционный [4, 5]. Для очистки небольших объемов воды, в частности, для индивидуального потребления, разработан ряд дорогостоящих синтетических сорбентов [6, 7]. Применение таких сорбентов для очистки больших объемов воды экономически нецелесообразно. В этой ситуации значительные преимущества перед синтетическими имеют неуглеродные материалы природного происхождения. По структуре и физико-химическим параметрам их разделяют на слоистые и слоисто-ленточные силикаты (вермикулит, монтмориллонит, каолинит, шабазит, модернит, клиноптилолит, глауконит и др.) и дисперсные крем-

нистые опал-кристобалитовые породы (кремнеземы) осадочного происхождения, на 68–99 % состоящие из аморфного диоксида кремния (опоки, трепела, диатомиты) [8–13]. Эти материалы сочетают относительно низкую себестоимость с хорошими сорбционными характеристиками. Кроме того, такие сорбенты обладают значительной устойчивостью к радиационному излучению. Важнейшим преимуществом сорбентов на основе природных алюмосиликатов является доступность и экологическая безопасность, что позволяет предлагать эффективные решения по очистке природных и сточных вод для различных регионов страны с использованием сорбентов, полученных на основе местного минерального сырья.

Однако природные алюмосиликаты, как правило, имеют недостаточную механическую прочность, поэтому их фильтрационные характеристики низки, затруднено их использование в динамическом режиме при высоких гидравлических нагрузках. Повышение эксплуатационных характеристик – механической прочности и фильтрационной способности – природных алюмосиликатных сорбентов возможно путем их гранулирования с использованием различных связующих. В работах [14, 15] рассмотрена целесообразность применения гранулированных сорбентов на основе природного глауконита для извлечения радионуклидов из природных вод при реабилитации территорий с высокой техногенной нагрузкой<sup>1</sup>.

Цель данного исследования – оценка перспективности применения природного глауконита Каринского месторождения (Челябинская обл., Россия) для сорбционного извлечения радионуклидов стронция из водных объектов Уральского региона.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для обеспечения возможности применения природного глауконита в процессах водоочистки применили технологию его гранулирования методом экстракции с использованием в качестве связующего – водопроводной воды<sup>2</sup>. В предварительных исследованиях установлено соответствие механической прочности разработанного сорбента (Гл-Гр-Н<sub>2</sub>О) требованиям ГОСТа 51641-2000 на фильтрующие зернистые материалы<sup>3</sup> и доказана возможность его использования в качестве фильтрующей загрузки очистных сооружений [16].

<sup>1</sup> Патент № 2429907. Гранулы из природного глауконита, состав и способ получения состава для изготовления гранул / заявители и патентообладатели ООО Научно-производственное предприятие «ЛИССКОН», Сержантов В.Г., Скиданов Е.В. (RU). заявл. 13.04.2010; опубл. 27.09.2011.

<sup>2</sup> Патент № 2348453. Способ получения гранулированного глауконита / Бетенеков Н.Д., Кутергина И.Н., Беднягин Г.В. № 2007140647/15; заявл. 01.11.2007; опубл. 10.03.2009.

<sup>3</sup> ГОСТ Р 51641-2000. Материалы фильтрующие зернистые. Общие технические условия. Введ. 01.07.2001. М.: Изд-во стандартов, 2000.

Условием разработки любой технологии очистки, основанной на сорбционном методе, является определение способности каждого материала поглощать тот или иной радионуклид. Обычно это свойство определяют либо в статических условиях на основании установления коэффициента распределения ( $K_d$ ), либо в динамических условиях по характеру «выходных кривых» [17].

В сорбционных экспериментах в качестве исходного модельного раствора применяли отстоянную не менее суток водопроводную воду с величиной  $pH = 6,5 \div 8,0$ . Концентрация стронция задавалась раствором  $SrCl_2$ , в качестве радиоактивного индикатора использовали  $^{90}Sr$ . Из исследуемых растворов отбирали пробы по 0,5 мл, которые помещали на металлические подложки, высушивали и, после выдерживания в течение двух недель для установления равновесия в генетически связанной паре  $^{90}Sr - ^{90}Y$ , проводили измерение содержания сорбата в пробе на установке малого фона УМФ-2000 с полупроводниковым детектором по  $\beta$ -счету.

Для определения сорбционных характеристик межфазного распределения стронция в статике готовили модельные растворы с переменным содержанием стронция ( $10^{-5} - 1$  г/л). Объем раствора с заданной концентрацией стронция составлял 25 мл. После приготовления растворов отбирали исходные пробы для радиометрирования. Затем в колбы с раствором помещали навески сорбента массой 0,25 г. Растворы выдерживали при периодическом перемешивании в течение двух недель. По результатам измерений рассчитывали степень извлечения ( $S$ ), коэффициент распределения ( $K_d$ ), мг/г, равновесную концентрацию радионуклида в растворе ( $C_p$ ), мг/мл, концентрацию радионуклида в фазе сорбента ( $C_T$ ), мг/г по формулам:

$$S = \frac{I_{исх} - I_{равн}}{I_{исх} - I_{ф}}, \quad (1)$$

где  $I_{исх}$  – скорость счета исходной пробы, имп/100с;

$I_{равн}$  – равновесная скорость счета, имп/100с;

$I_{ф}$  – скорость счета фона, имп/100с.

$$K_d = \frac{S}{1 - S} \cdot \frac{V_{пр}}{m_{сорб}}, \quad (2)$$

где  $V_{пр}$  – объем пробы, мл;

$m_{сорб}$  – масса сорбента, г.

$$C_p = C_0(1 - S), \quad (3)$$

где  $C_0$  – концентрация стронция в исходной пробе, мг/мл.

$$C_T = (C_0 - C_p) \cdot \frac{V_{\text{пр}}}{m_{\text{сорб}}} \quad (4)$$

Для расчетов использованы формулы из работы [18]. По полученным результатам построены изотермы сорбции в координатах «концентрация стронция в сорбенте от равновесной концентрации стронция в растворе» ( $\lg C_T - \lg C_p$ ), определена область выполнения изотермы Генри, рассчитаны коэффициент распределения  $K_d$  и статическая обменная емкость (СОЕ).

При изучении кинетики сорбции радионуклида гранулированным глауконитом использовался режим рециркуляции, в соответствии с которым исследуемый раствор прокачивается через заполненную сорбентом колонку и вновь возвращается в емкость с исходным раствором. Предложенная методика исследования позволяет уменьшить влияние механического разрушения сорбента вследствие перемешивания. Диаметр колонки – 1 см, масса загрузки сорбента – 2 г, объем раствора – 500 мл, концентрация стронция – 1 мг/л. После внесения в раствор  $^{90}\text{Sr}$  отбирали пробы, радиометрировали на УМФ-2000, определяя исходную скорость счета ( $I_{\text{исх}}$ ).

Эксперимент проводили при скоростях фильтрации 0,5 и 1 мл/мин, которые устанавливали с помощью перистальтического насоса. Через заданные промежутки времени отбирали пробы из раствора, определяя равновесное значение скорости счета ( $I_{\text{равн}}$ ). Фильтрацию раствора проводили в течение 3–4 ч, затем прекращали на 10–12 ч и далее возобновляли с прежней скоростью. Такую постановку эксперимента рассматривали как реализацию метода прерывания [19].

По результатам измерений рассчитывали степень сорбции ( $S$ ) по формуле (1), степень достижения сорбционного равновесия ( $F$ ), строили кинетические зависимости сорбции в координатах « $S - t$ » и « $-\ln(1 - F) - t$ ». Для расчета степени достижения сорбционного равновесия использовали формулу:

$$F = S_t / S_{\infty}, \quad (5)$$

где  $S_t$  – степень извлечения  $i$ -той пробы в момент времени  $t$ ;

$S_{\infty}$  – степень извлечения в условиях равновесия. За равновесную степень извлечения  $S_{\infty}$  принимали величину сорбции, достигнутую после 600 мин перекачивания модельного раствора через колонку.

Очистка больших объемов загрязненных природных вод организуется по принципу непрерывного процесса на фильтровальных установках. Для моделирования фильтрационных процессов в данной работе проведено исследование применения гранулированного материала в динамических условиях с использованием в качестве модели фильтра колонки из оргстекла диаметром 1 см. Масса загрузки сорбента – примерно 2 г, скорость

фильтрации задавали с помощью перистальтического насоса 0,5 мл/мин (6÷8 к.о./ч), что составляло около 0,4 мл/мин.см<sup>2</sup>. Объемы загрузки колонки и всей динамической системы вместе с колонкой составили 5 и 20 мл соответственно. В качестве модельного раствора использовали водопроводную воду с концентрацией стабильного стронция 1 мг/л. В модельный раствор объемом 500 мл добавляли радиоактивную метку <sup>90</sup>Sr.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Выходную кривую сорбции получали, последовательно пропуская через колонку модельный раствор со стабильным стронцием, а затем фракцию того же состава, содержащую дополнительно в качестве радиоактивной метки <sup>90</sup>Sr. Через колонку, загруженную сорбентом, пропускали 200 мл приготовленного модельного раствора без метки. Далее переключали шланг забора воды от насоса в стакан с меченым раствором, пропускали 20 мл раствора с меткой и отдельно фракцию 10 мл, предназначенную для отбора пробы на измерение. Из последней фракции отбирали в кювету пробу объемом 0,5 мл, проводили измерения в соответствии с описанной выше методикой для <sup>90</sup>Sr, затем шланг насоса возвращали в емкость с модельным раствором и продолжали эксперимент. Таким образом, один фильтрационный цикл начинался с пропускания раствора без метки и заканчивался пропусканием раствора с меткой. Такая организация исследования процесса динамики позволяет пропускать большие объемы исследуемого раствора, не допуская накопления активности радионуклида стронция в колонке.

В результате измерений определяли скорость счета филтраты  $I_{\text{фил}}$ , имп/с, исходную скорость счета  $I_{\text{исх}}$ , имп/с, рассчитывали проскок П:

$$\Pi = \frac{I_{\text{фил}}}{I_{\text{исх}}}, \quad (6)$$

и строили зависимость проскока от пропущенного объема в координатах «П – V» с погрешностью. Общий объем пропущенного через колонку раствора в этом случае будет равен сумме объемов раствора без метки <sup>90</sup>Sr и радиоактивным индикатором.

Коэффициент распределения в динамических условиях ( $K_d^*$ ) определяли по формуле:

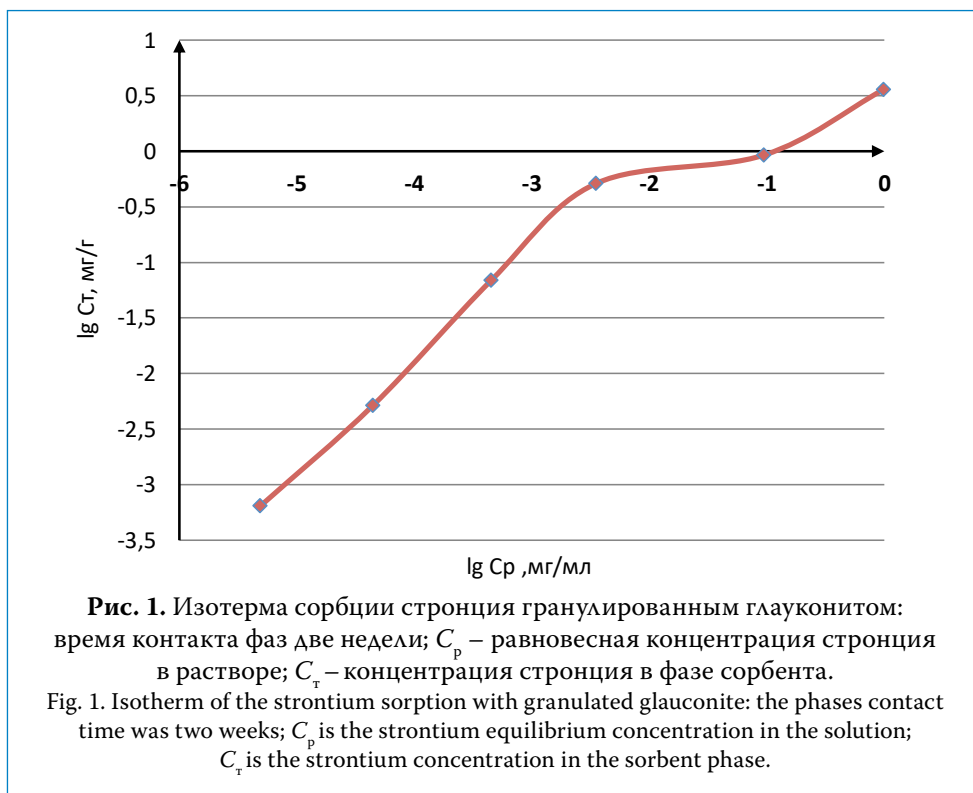
$$K_d^* = \frac{1 - \Pi}{\Pi} \cdot \frac{V_{\Sigma}}{m_{\text{загр}}}, \quad (7)$$

где  $m_{\text{загр}}$  – масса загрузки сорбента в колонке, г;

$V_{\Sigma}$  – общий объем пропущенного через колонку модельного раствора, л.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены результаты исследования сорбции стронция гранулированным глауконитом в статических условиях. Коэффициенты уравнения  $y = ax + b$  формальной линеаризации полученной изотермы и ее прямолинейного участка в области малых концентраций приведены в табл. 1.



**Таблица 1.** Результаты формальной линеаризации изотермы сорбции стронция

Table 1. Results of the strontium sorption isotherm formal linearization

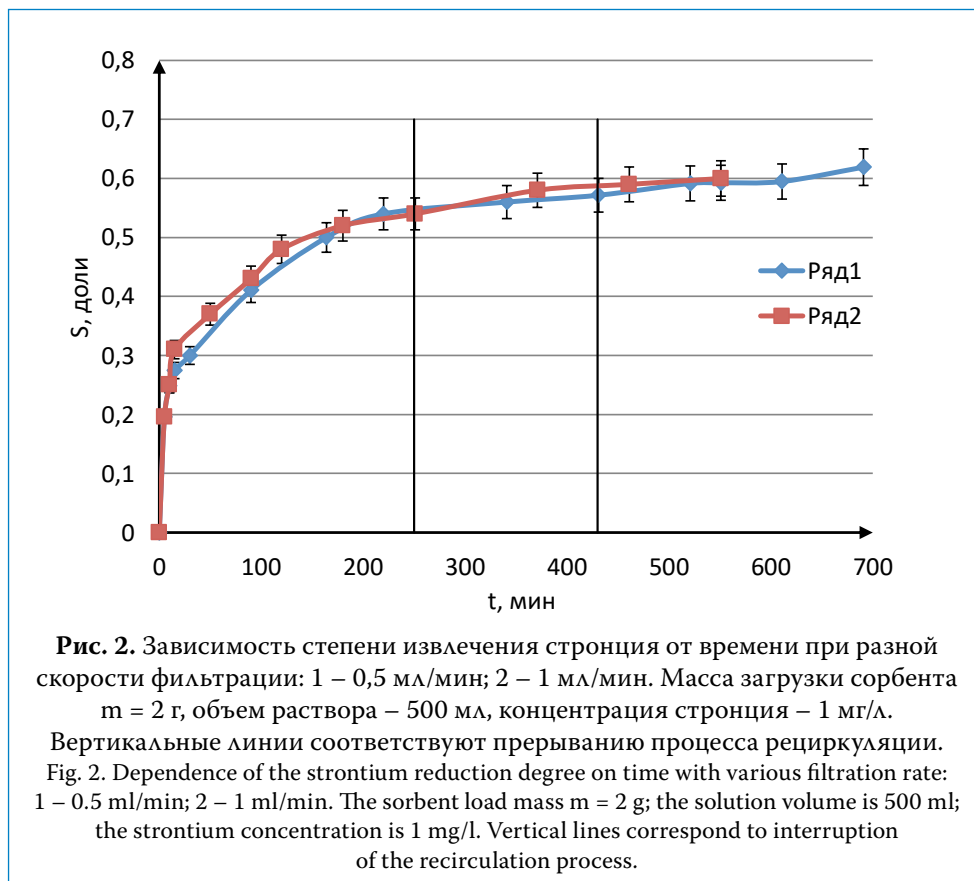
Время контакта фаз	Диапазон концентраций $C_0$ , г/л	$a \pm \Delta a$	$b \pm \Delta b$
2 недели	$10^{-5} - 1$	$0,47 \pm 0,21$	$0,59 \pm 0,12$
	$10^{-5} - 10^{-2}$	$1,09 \pm 0,12$	$2,54 \pm 0,48$



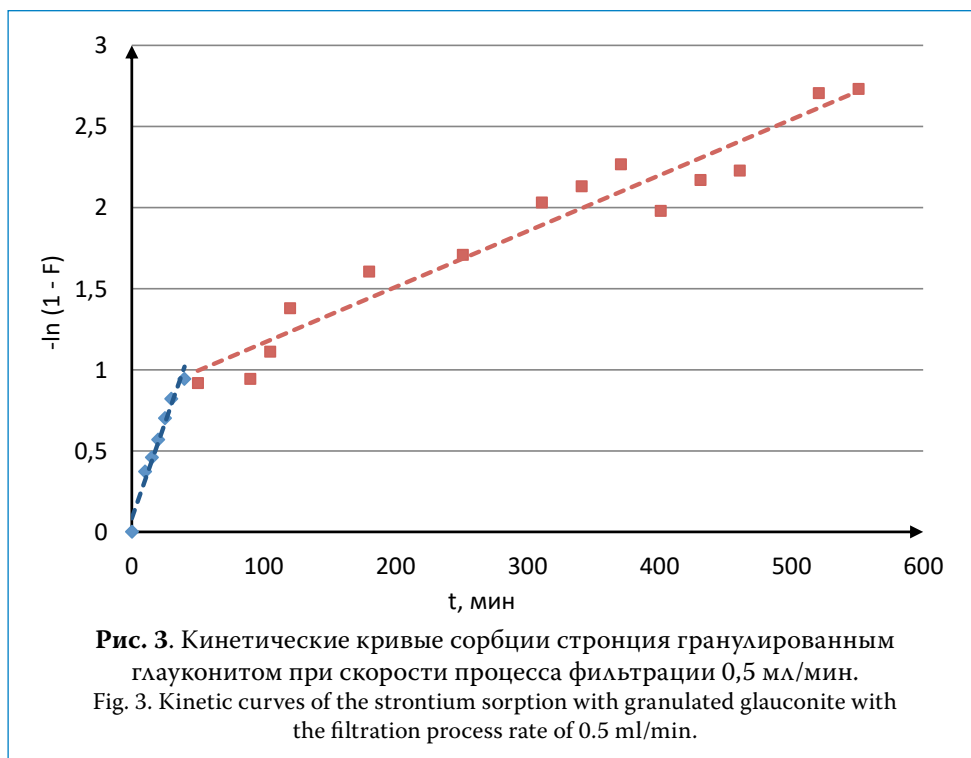
Как следует из анализа изотермы сорбции, в диапазоне концентраций стронция  $10^{-5} - 10^{-2}$  г/л тангенс угла наклона прямой примерно равен 1, что свидетельствует о выполнении закона Генри и указывает на постоянство  $K_d$  в этой области. Полученное значение коэффициента распределения стронция ( $346 \pm 29$ ) мл/г сравнимо со значением этого показателя для природного глауконита ( $200 \pm 24$ ) мл/г [20].

Таким образом, гранулирование не повлекло ухудшения сорбционных свойств природного минерала. Достигнутое значение COE в исследованном интервале концентраций для гранулированного глауконита составило  $\geq 4,2$  мг/г. Профиль изотермы свидетельствует о возможном присутствии в структуре сорбента нескольких типов сорбционных центров, характеризующихся различными значениями коэффициента распределения.

Зависимость степени извлечения стронция гранулированным глауконитом от времени контакта фаз приведена на рис. 2.



Влияния скорости фильтрации на степень извлечения сорбата не выявлено. Кинетические кривые сорбции стронция гранулированным глауконитом, полученные после обработки зависимостей « $S - t$ » (рис. 2), построены в координатах « $-\ln(1 - F) - t$ ». На рис. 3 представлена кинетическая кривая сорбции, полученная при скорости 0,5 мл/мин. Вид кинетической кривой сорбции для скорости фильтрации 1 мл/мин имеет аналогичный характер. Результаты математической обработки зависимостей « $-\ln(1 - F) - t$ » для обеих скоростей фильтрации указаны в табл. 2. На полученных зависимостях выделены линейные участки. Уравнения линейной регрессии представлены в виде  $y = ax + b$ , определены погрешности коэффициентов уравнения. Коэффициент  $a$  равен константе скорости процесса  $k$ . В результате анализа полученных зависимостей установлено время полуобмена ( $t_{0,5}$ ).



Исходя из полученных результатов, на зависимостях можно выделить два линейных участка. На первом значение коэффициента  $b \leq \Delta b$ , скорость реакции растет. На втором участке кинетическая кривая не исходит из начала координат ( $b \geq \Delta b$ ), скорость реакции снижается на порядок. Возможно, что на первой стадии процесс сорбции лимитируется внешней диффузией.

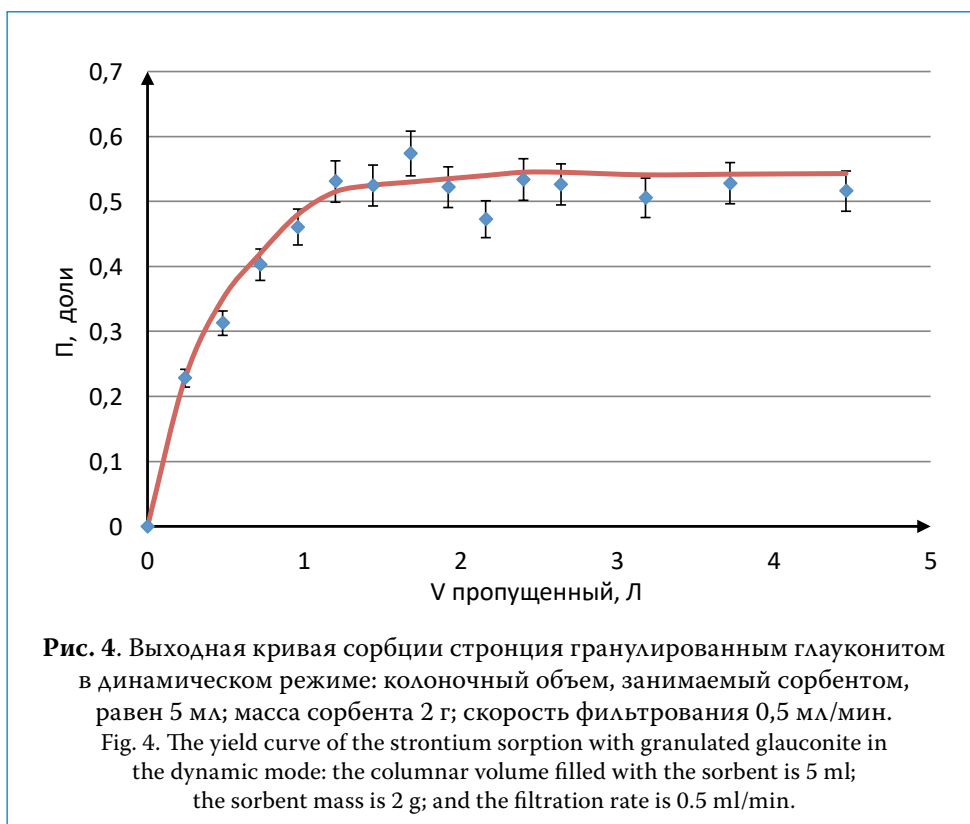
**Таблица 2.** Результаты обработки кинетических кривых сорбции стронция гранулированным глауконитом  
Table 2. Results of the strontium sorption kinetic curves with granulated glauconite

Скорость фильтрации, мл/мин	$t_{0,5}$ , мин	$s$	Временной диапазон, мин	$k \pm \Delta k$ , мин <sup>-1</sup>	$b \pm \Delta b$
0,5	30	1	0–40	$(3,0 \pm 0,7) \cdot 10^{-2}$	$(0,08 \pm 0,12)$
		2	40–550	$(3,40 \pm 0,41) \cdot 10^{-3}$	$(0,82 \pm 0,11)$
1,0	35	1	0–40	$(3,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$	$(0,07 \pm 0,11)$
		2	40–550	$(3,23 \pm 0,33) \cdot 10^{-3}$	$(0,68 \pm 0,09)$

Вместе с тем, отсутствие влияния скорости перемешивания раствора на степень сорбции стронция не подтверждает предположение о том, что на второй стадии процесс лимитируется внутренней диффузией. Поэтому, на наш взгляд, две стадии процесса обусловлены возможным существованием в структуре сорбента, как минимум, двух типов сорбционных центров с различными кинетическими характеристиками. Результаты исследования сорбции стронция гранулированным глауконитом в динамическом режиме представлены на рис. 4.

Определены следующие характеристики процесса сорбции стронция в динамических условиях: средняя степень извлечения – 0,52; обменная емкость – 0,98 мг/г; значение коэффициента распределения  $K_d$  –  $2,42 \cdot 10^3$  мл/г. Расчет выполнен при средней степени извлечения стронция 0,52, пропущенном через колонку объеме раствора 4,46 л и массе сорбента 2 г. Для сравнения, коэффициент распределения, определенный в пробе с такой же концентрацией стронция в статических условиях по изотерме «lg  $C_T$  – lg  $C_p$ », составил  $3,46 \cdot 10^3$  мл/г. Превышение коэффициента распределения в динамике над значением, полученным в статических условиях, можно объяснить дополнительной сорбцией стронция гидроксидом железа, накапливающимся в межзерновом пространстве загрузки колонки при пропускании воды [5]. Вид выходной кривой и высокие значения проскока, которые наблюдаются при пропускании уже первых порций раствора, возможно связаны с характерной для алюмосиликатов низкой скоростью межфазного распределения сорбата между твердой и жидкой фазами.

Величина динамической обменной емкости (0,98 мг/г) значительно ниже статической обменной емкости (4,2 мг/г). Насыщения сорбента стронцием в динамических условиях достичь не удалось.



После пропускания через колонку 4,5 л модельного раствора уплотнения сорбента не наблюдалось, что свидетельствует о сохранении им гидродинамических характеристик и подтверждает возможность использования в качестве загрузки фильтров в системах водоочистки.

#### ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований установлено, что в диапазоне концентраций стронция ( $10^{-5} - 10^{-2}$ ) г/л тангенс угла наклона изотермы сорбции в координатах «концентрация стронция в сорбенте от концентрации стронция в растворе» примерно равен 1, что свидетельствует о выполнении закона Генри и указывает на постоянство коэффициента распределения ( $K_d$ ). В этой области реализуется значение коэффициента распределения по стронцию около  $3,46 \cdot 10^2$  мл/г, что сопоставимо с исходным природным глауконитом (200 мл/г) Каринского месторождения. Достигнутая статическая обменная емкость в интервале концентраций стронция ( $10^{-5} - 1$  г/л) составила  $\geq 4,2$  мг/г.

По результатам исследования кинетики сорбции в режиме рециркуляции определено, что кинетические зависимости имеют два участка. На первом участке скорость реакции растет, на втором кинетическая кривая не исходит из начала координат и скорость реакции существенно снижается. Многостадийность процесса обусловлена возможным существованием в структуре сорбента, как минимум, двух типов сорбционных центров с различными кинетическими характеристиками.

Определены характеристики сорбционного процесса с участием глауконита в динамических условиях: коэффициент распределения и достигнутая динамическая обменная емкость для стронция составляют не менее  $2,42 \cdot 10^3$  мл/г и 0,98 мг/г соответственно. Для увеличения динамической обменной емкости потребуется уменьшить скорость фильтрации. Коэффициент распределения стронция в динамических условиях ( $2,42 \cdot 10^3$  мл/г) превышает коэффициент распределения стронция в статических условиях ( $3,46 \cdot 10^2$  мл/г).

Полученные результаты сорбционных экспериментов позволяют рекомендовать сорбент в качестве загрузки фильтра для очистки радиоактивно загрязненных природных вод от радионуклида  $^{90}\text{Sr}$ . Использование сорбента, полученного на основе местного минерального сырья, позволяет сократить расходы на очистку техногенно загрязненных водных объектов Уральского региона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников Ю. А., Алиев Р. А., Калмыков С. Н. Радиоактивность окружающей среды: Теория и практика. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 286 с.
2. Очкин А.В., Бабаев Н.С., Магомедбеков Э.П. Введение в радиоэкологию: уч. пос. для вузов. М.: ИздАТ, 2003. 200 с.
3. Nedobukh T.A., Semenishchev V.S. Strontium: source, occurrence, properties and detection. // Handbook of Environmental Chemistry, 2020. 88. P. 1–23.
4. Voronina A.V., Semenishchev V.S., Gupta D.K. Use of sorption method for strontium removal // Handbook of Environmental Chemistry, 2020. 88. P. 203–226.
5. Кузнецов Ю.В., Щебетковский В.Н., Трусов А.Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. М.: Атомиздат, 1974. 360 с.
6. Ким Виктория. Применение искусственных и природных сорбентов для очистки сточных вод от нефтепродуктов // Водоочистка. 2020. № 4. С. 28–31.
7. Bezhin N.A., Dovhyi I.I., Lyapunov A.Yu. Sorption of strontium by sorbents on the base of di-(tert-butylcyclohexano)-18-crown-6 with use of various diluents // J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2017. Vol. 311. No. 1. P. 317–322.
8. Санжанова С.С., Зонхоева Э.Л. Очистка рудничных вод природными сорбентами. // Вода: химия и экология. 2016. № 6. С. 58–63.
9. Беляк А.А., Смирнов А.Д., Ходырев В.М. Оценка возможности использования цеолитсодержащего трепела в системе очистки ливневых стоков // Вода и экология: проблемы и решения, 2015. № 4 (64). С. 44–55.

10. Изучение потенциала торфа как сорбента ионов Cu(II) и Pb(II) из водных растворов / А.И. Фокина [и др.] // Вода и экология: проблемы и решения, 2017. № 3 (71). С. 67–82.
11. Концентрирование цезия и стронция из водных систем адсорбентами на основе бентонитовых глин / В. В. Юрченко [и др.] // Бутлеровские сообщения. 2016. Т. 47. № 7. С. 52–56.
12. Sviridov D.V., Nikiforov A.F. Separation of cesium-137 from natural waters using the sorbents based on opal-cristobalite rocks / AIP Conference Proceedings 2313, 050034 (2020). DOI: 10.1063/5.0033024
13. Voronina A.V., Kutergin A.S., Semenistchev V.S., Nogovitsyna E.V., Nikiforov A.F. Sorbents for radiocesium removal from natural water and soil / Book: Impact of Cesium on Plants and the Environment. Editors: Dharmendra K. Gupta, Clemens Walther. Springer. Germany. 2016. P. 231–252. DOI: 10.1007/978-3-319-41525-3-13.
14. Русинова И.Н. Применение гранулированного сорбента на основе глауконита в народном хозяйстве. Режим доступа: [rusnauka.com>2\\_KAND\\_2014/Ecologia/2\\_156184.doc.htm](http://rusnauka.com>2_KAND_2014/Ecologia/2_156184.doc.htm).
15. Voronina A.V., Semenishchev V.S., Bykov A.A., Savchenko M.O., Kutergin A.S., Nedobuh T.A. Approaches to rehabilitation of radioactive contaminated territories // J. of Chemical Technology and Biotechnology. Vol. 88. 2013. P. 1606–1611. DOI: 10.1002/jctb.4142.
16. Кутергин А.С., Недобух Т.А., Никифоров А.Ф., Иманова В.В. Применение гранулированного глауконита и модифицированного на его основе сорбента в процессах очистки водных систем от радионуклидов цезия // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 4. С. 86–98. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-4-7.
17. Кузнецов Ю.В., Щebetковский В.Н., Трусов А.Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. М.: Атомиздат, 1974. 360 с.
18. Радиоактивные индикаторы в химии. Основы метода / В.Б. Лукьянов, Бердонос С.С., Богатырев И.О., Заборенко К.Б., Иофа Б.З. М.: Высшая школа, 1985. 287 с.
19. Недобух Т.А., Воронина А.В., Кутергин А.С. Основы радиохимии и дозиметрии: учеб.-метод. пос. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 136 с.
20. Воронина А.В., Кутергин А.С., Недобух Т.А. Возможность использования глауконита в процессах очистки водных сред на территориях с техногенной нагрузкой // Экология и промышленность России. 2013. № 200. С. 33–35.

#### REFERENCES

1. Sapozhnikov I. A., Aliev R. A., Kalmykov S. N. *Radioaktivnost' okruzhaiushchei sredy: Teoriia i praktika* [Radioactivity of environment: theory and practice] М.: BINOM. Laboratoriia znaniy, 2006. 286 s. (Metody v khimii). Rezhim dostupa: <http://www.chem.msu.ru/> (in Russ.)
2. Ochkin A.V., Babaev N.S., Magomedbekov E.P. *Vvedenie v radioekologiiu* [Introduction to radioecology]: uch. pos. dlia vuzov. М.: IzdAT, 2003. 200 s. (in Russ.)
3. Nedobukh T.A., Semenishchev V.S. *Strontium: source, occurrence, properties and detection. Handbook of Environmental Chemistry*, 2020. 88. P. 1-23.

4. Voronina A.V., Semenishchev V.S., Gupta D.K. *Use of sorption method for strontium removal, Handbook of Environmental Chemistry*, 2020. 88. P. 203-226.
5. Kuznetsov Iu.V., Shchetkovskii V.N., Trusov A.G. *Osnovy ochistki vody ot radioaktivnykh zagriazneniy* [Foundations of water purification from radioactive contaminations]. M.: Atomizdat, 1974. 360 p. (in Russ).
6. Kim Viktoriya. *Primenenie iskusstvennykh i prirodnykh sorbentov dlia ochistki stochnykh vod ot nefteproduktov* [The use of artificial and natural adsorbents for wastewater treatment in terms of petrol products] *Vodoochistka*. 2020. No. 4. P. 28-31 (in Russ).
7. Bezhin N.A., Dovhyi I.I., Lyapunov A.Yu. Sorption of strontium by sorbents on the base of di-(tert-butylcyclohexano)-18-crown-6 with use of various diluents // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2017. V. 311. No. 1. P. 317–322.
8. Sanzhanova S.S., Zonkhoeva E.L. *Ochistka rudnichnykh vod prirodnyimi sorbentami*. [Pit waters treatment with natural adsorbents], *Voda: khimiia i ekologiia*. 2016. No. 6, P. 58-63 (in Russ).
9. Beliak A.A., Smirnov A.D., Khodyrev V.M. *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniia tselit-soderzhashchego trepela v sisteme ochistki livnevnykh stokov* [Estimation of the possibilities of the zeolite-containing trepoli powder use in the rainstorm wastewater treatment systems] *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2015. No 4, (64). P. 44-55 (in Russ).
10. *Izuchenie potentsiala torfa kak sorbenta ionov Cu(II) i Pb(II) iz vodnykh rastvorov* [Studying of the peat potential as a adsorbent of Cu(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions] A.I. Fokina [et al.] // *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2017. No. 3 (71). P. 67-82 (in Russ).
11. *Kontsentrirovaniye tseziya i strontsiya iz vodnykh sistem adsorbentami na osnove bentonitovykh glin* [Reduction of cesium and strontium from aquatic systems with bentonitic clays-based adsorbents] V. V. Iurchenko [et al.] *Butlerovskie soobshcheniya*. 2016. V. 47. No. 7. P. 52-56 (in Russ).
12. Sviridov D.V., Nikiforov A.F. *Separation of cesium-137 from natural waters using the sorbents based on opal-cristobalite rocks*, AIP Conference Proceedings 2313, 050034 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0033024>.
13. Voronina A.V., Kutergin A.S., Semenistchev V.S., Nogovitsyna E.V., Nikiforov A.F. Sorbents for radiocesium removal from natural water and soil. *Impact of Cesium on Plants and the Environment*. Editors: Dharmendra K. Gupta, Clemens Walther. Springer. Germany. 2016. P. 231–252. DOI: 10.1007/978-3-319-41525-3-13.
14. Rusinova I.N. *Primenenie granulirovannogo sorbenta na osnove glaukonita v narodnom khoziaistve* [The use of granulated sorbent baseds on glauconite in people's economy]. Rezhim dostupa: [rusnauka.com](http://rusnauka.com) (in Russ).
15. Voronina A.V., Semenishchev V.S., Bykov A.A., Savchenko M.O., Kutergin A.S., Nedobukh T.A. Approaches to rehabilitation of radioactive contaminated territories // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. Vol. 88. 2013. P. 1606–1611. DOI: 10.1002/jctb.4142.
16. Kutergin A.S., Nedobukh T.A., Nikiforov A.F., Imanova V.V. *Primenenie granulirovannogo glaukonita i modifitsirovannogo na ego osnove sorbenta v protsessakh ochistki vodnykh sistem ot radionuklidov tseziia* [The use of granulated glauconite and the sorbent modified on its basis in the processes of water systems purification]. *Water*

- Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2017. No 4. P. 86-98 (in Russ). DOI: 10.35567.
17. Kuznetsov Iu.V., Shchebetkovskii V.N., Trusov A.G. *Osnovy ochistki vody ot radioaktivnykh zagriazneniy* [Foundations of water treatment in terms of radioactive contamination]. M.: Atomizdat, 1974. 360 p. (in Russ).
  18. Radioaktivnye indikatory v khimii. *Osnovy metoda* [Radioactive indicators in chemistry] V.B. Luk'ianov, Berdonosov S.S., Bogatyrev I.O., Zaborenko K.B., Iofa B.Z. M.: Vysshaia shkola, 1985. 287 p. (in Russ).
  19. Nedobukh T.A., Voronina A.V., Kutergin A.S. *Osnovy radiokhimiya i dozimetriya* [Basic radiometry and dosimetry]: ucheb.-metod. pos. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta, 2015, 136 p. (in Russ).
  20. Voronina A.V., Kutergin A.S., Nedobukh T.A. Vozmozhnost' ispol'zovaniia glaukonita v protsessakh ochistki vodnykh sred na territoriiakh s tekhnogennoi nagruzkoj [Possibilities of the glauconite use in the processes of water environment treatment on the artificially loaded territories] *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia] 2013. No. 200. P. 33–35 (in Russ).

#### **Сведения об авторах:**

**Кутергин Андрей Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, кафедра радиохимии и прикладной экологии, Физико-технологический институт, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 21; e-mail:andr.kutergin@mail.ru

**Недобух Татьяна Алексеевна**, канд. хим. наук, доцент, кафедра радиохимии и прикладной экологии, Физико-технологический институт, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 21; e-mail: t.a.nedobukh@urfu.ru

**Никифоров Александр Федорович**, д-р хим. наук, профессор, кафедра радиохимии и прикладной экологии, Физико-технологический институт, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 21; e-mail: alex.f.nikiforov@mail.ru

**Зенкова Ксения Игоревна**, младший научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 23; e-mail: kseniya.zenkova@mail.ru.

**Тарасовских Таисия Васильевна**, магистрант, кафедра радиохимии и прикладной экологии, Физико-технологический институт, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 21; e-mail: tarasovskihmaya@yandex.ru

#### **About authors:**

Andrey S. Kutergin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Radiochemistry and Applied Ecology, Institute of Physics and Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, ul. Mira, 21, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: andr.kutergin@mail.ru



Tatiana A. Nedobukh, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Radiochemistry and Applied Ecology, Institute of Physics and Technology, B. N. Yeltsin Ural Federal University, ul. Mira, 21, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: t.a.nedobukh@urfu.ru

Aleksandr F. Nikiforov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of Radiochemistry and Applied Ecology, Institute of Physics and Technology, B. N. Yeltsin Ural Federal University, ul. Mira, 21, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: alex.f.nikiforov@mail.ru

Ksenia I. Zenkova, Junior Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Mira, 23, Ekaterinburg, 620049, Russia; e-mail kseniya.zenkova@mail.ru.

Taisiya V. Tarasovskikh, Master's Student, Department of Radiochemistry and Applied Ecology, Institute of Physics and Technology, B. N. Yeltsin Ural Federal University, ul. Mira, 21, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: tarasovskihtaya@yandex.ru