

DOI 10.15593/2409-5125/2017.04.07

УДК 579.26

**А.А. Ананко, О.И. Бахирева, Е.А. Фарберова, Л.С. Пан**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## **РАЗРАБОТКА БИОСОРБЦИОННОГО МЕТОДА ОЧИСТКИ ПРИРОДНОЙ ВОДЫ ОТ ИОНОВ СТРОНЦИЯ**

Статья посвящена актуальной проблеме очистки водных экосистем, загрязненных ионами стронция, в частности рек центральной полосы России и Пермского края. Из вод реки Сылва (г. Кунгур, Пермский край) были выделены клетки бактерий, обладающие способностью аккумулировать преимущественно ионы стронция из модельных растворов. Для сокращения материальных затрат при отделении клеток бактерий от загрязненных вод была проведена их иммобилизация на пористые носители. Сравнение изученных сорбционных емкостей исходных материалов и готовых биосорбентов позволяет сделать вывод об увеличении емкости и избирательности полученных биосорбентов.

На основании методик многофакторного эксперимента в статье приведено изучение влияния наиболее значимых факторов на процесс биосорбции. Согласно проведенным исследованиям, представленным в работе, незначительное варьирование температуры не влияет на степень очистки модельного раствора от ионов стронция, которая была выбрана в качестве параметра оптимизации. Изменение значений водородного показателя среды также не считается значимым, поэтому при проведении очистки природной воды в промышленных масштабах необходимо контролировать начальные концентрации ионов стронция и конкурирующих ионов кальция для поддержания степени очистки на высоком уровне.

**Ключевые слова:** ионы стронция, микроорганизмы, иммобилизация клеток, пористые природные носители, многофакторный эксперимент, биосорбционный метод очистки.

В настоящее время достаточно остро стоит проблема, связанная с запасами чистой воды. Это вызвано нарастающим в последние годы загрязнением водоемов веществами антропогенного происхождения. Качество воды многих рек характеризуется повышенными концентрациями фенолов, хлорорганических пестицидов, а также ионов металлов.

Анализ качества подземных вод выявил точечные загрязненные водные объекты, связанные с природными аномалиями. Аномальное содержание общего стронция характерно для вод Пермского края, Калужской,

---

Разработка биосорбционного метода очистки природной воды от ионов стронция / А.А. Ананко, О.И. Бахирева, Е.А. Фарберова, Л.С. Пан // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 4. – С. 92–103. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.04.07

Ananko A., Bakhireva O., Farberova E., Pan L. Application multivariate of experiment for optimization of the biosorbent, extracting strontium ions from a solution. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2017. No. 4. Pp. 92-103. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.04.07

Московской, Смоленской и ряда других областей. Содержание общего стронция в водах колеблется в пределах 15–45 мг/л.

Будучи близок к кальцию по химическим свойствам, стронций резко отличается от него по своему биологическому действию. Избыточное содержание этого элемента в почвах, водах и продуктах питания вызывает «уровскую болезнь» у человека и животных – поражение и деформацию суставов, задержку роста и др. [1].

На действующих водопроводных станциях в основном применяются технологии, не соответствующие современному уровню загрязнений, и часто не отвечающие требованиям санитарных правил и норм (СанПиН 2.1.4.1074–01 с изм. от 25.02.10) [2]. В связи с этим в сочетании с традиционными технологиями необходимо применять новые методы, позволяющие обеспечить существующие нормативы.

В последнее время в нашей стране и за рубежом на станциях водоподготовки применяют традиционные схемы в сочетании со степенью предварительной очистки, которая позволяет удалять природные загрязнения в начале технологической цепочки.

В сложившейся ситуации перспективным является применение в качестве ступени биологической предочистки воды технологии, совмещающие в себе процессы сорбции загрязнений и аккумуляции ионов металла в одном сооружении, что позволит удалять наряду с природными загрязнениями также загрязнения антропогенного характера.

Одним из методов, позволяющих реализовать данную технологию, является разработанный в НИИ ВОДГЕО новый биотехнологический способ глубокой очистки вод – биосорбция. Разработанный первоначально в качестве метода глубокой доочистки сточных вод он нашел успешное применение для очистки воды от ряда специфических загрязнений. Исследования, проведенные на чистых биорезистентных и трудноокисляемых веществах, позволили распространить применение биосорбционного метода на природные воды, которые отличаются от сточных более низкими концентрациями загрязнений, наличием преимущественно трудноокисляемых веществ, сезонным характером их появления в периоды относительно непродолжительных паводков, а также низкими температурами воды в течение длительного зимнего периода.

Принципиальная возможность применения биосорбционного метода в качестве ступени предочистки продемонстрирована специалистами НИИ ВОДГЕО результатами обширных исследований [3]. Однако недостаточная научная информация по ряду вопросов ограничивала широкое применение в схемах водоподготовки.

Физическое поведение микробной популяции, существующей в виде отдельных клеток, взвешенных в жидкой среде, определяется особенностями жидкости как таковой. Другими словами, индивидуальные клетки ведут себя как элементы жидкости, в которой они суспендированы. Поэтому при удалении жидкости из сосуда, содержащего взвешенную микробную популяцию, часть клеточной популяции также будет изъята. Это накладывает жесткие ограничения на эксплуатацию таких систем, поскольку часто требуется, чтобы клетки были сохранены для непрерывного или повторного культивирования. С этой целью клетки необходимо отделить от среды, что легко достигается, если клетки могут быть помещены в условия, при которых их физические (гидродинамические) характеристики отличаются от таковых жидкости. В этом случае клетки можно рассматривать как иммобилизованные [4–7].

Иммобилизация клеток может быть естественным процессом или может быть вызвана химическими или физическими способами, если использование иммобилизованных клеток предполагает увеличение выхода продукта или степени очистки [8–10].

Накопительную и чистую культуры получали из проб воды реки Сылва (г. Кунгур, Пермский край). Выбор источника микроорганизмов основан на том, что в настоящее время обнаруживается в пробах воды высокие концентрации ионов стронция. В данном районе находятся месторождения таких минералов, как гипс, кальцит, целестин и др. Таким образом, повышенное содержание ионов стронция обеспечивает среду, в которой возможно существование микроорганизмов, поглощающих ионы стронция.

Согласно результатам исследования, представленным в табл. 1, были идентифицированы выделенные клетки микроорганизмов. Ими оказались Г-бактерии рода *Acinetobacter*. Идентификация клеток позволит определить патогенность (если она имеет место быть) и, как следствие, определить спектр применения. Так, например, выделенные клетки бактерий могут быть использованы на сооружениях по водоподготовке без применения жесткого контроля обсемененности подготовленной воды, однако для их активной жизнедеятельности требуется аэрация среды, так как они являются строгими анаэробами [11–15].

При сорбции в статических условиях клетки бактерий способны селективно аккумулировать ионы стронция из раствора в присутствии солей кальция.

Использование отдельных клеток микроорганизмов или их агломератов удобно при небольших объемах раствора, однако при крупнотоннажной очистке необходима иммобилизация бактерий на поверхность твердо-

го носителя. Как правило, носителями являются природные материалы, так как обладают доступностью и низкой токсичностью, поэтому в качестве твердой основы были выбраны отсеы угля, являющиеся побочным продуктом при производстве углеродных сорбентов.

Таблица 1

Характеристика физиолого-биохимических особенностей  
выделенной культуры

Наименование теста	Полученный цвет	Результат
Утилизация углеводов:		
сахароза	Желтый	+
маннит	Желтый	+
глюкоза	Желтый	+
лактоза	Красный	–
манноза	Желтый	+
Определение индола	Окрашивание отсутствует	–
Определение уреазы	Розовый	+
Определение фенилаланин-дезаминазы	Окрашивание отсутствует	–
Реакция Фогес – Проскауэра	Через 15 мин после закапывания 1–2 капель 6 % раствора $\alpha$ -нафтола и 40 % раствора калия гидроокиси окрашивание отсутствует	–
Тест OF с глюкозой	Желтый	+
Определение декарбоксилазы лизина	Синий	+
Определение декарбоксилазы орнитина	Интенсивно-зеленый	+
Определение дегидролазы аргинина	Изумрудный	+
Утилизация цитрата натрия	Ярко-розовый	+
Утилизация малоната натрия	Ярко-красный	+
Определение сероводорода	Кремовый	–
Утилизация многоатомных спиртов:		
инозит	Желтый	+
сорбит	Желто-оранжевый	+
КОН метод	Культура «тянется»	Г–
Форма клеток	Короткие толстые палочки, кокки, зачастую образуют колонии из нескольких клеток	
Каталазная активность	Интенсивное выделение пузырьков водорода	+

Иммобилизацию клеток проводили путем адгезии клеток бактерий на носителе. Для оценки свойств полученных биосорбционных материалов была проведена сорбция ионов стронция и кальция, сравнительные характеристики представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Сравнение сорбционных характеристик биосорбционных материалов

Наименование сорбционного материала	Значение максимальной адсорбции $A_{\infty}$ , мг-экв/г	Значение константы Ленгмюра К
<i>Сорбция ионов <math>Sr^{2+}</math></i>		
Бактерии р. <i>Acinetobacter</i>	0,0206	0,1010
Отсевы БАУ	0,0095	0,0793
Биоотсевы БАУ	0,0594	0,2042
<i>Сорбция ионов <math>Ca^{2+}</math></i>		
Бактерии р. <i>Acinetobacter</i>	0,0550	0,1801
Отсевы БАУ	0,0155	0,0074
Биоотсевы БАУ	0,0471	0,0210

Как видно из результатов исследования, приведенных в табл. 2, биосорбционный материал, синтезированный на основе отсевов угля БАУ и бактерий рода *Acinetobacter*, обладает высокой сорбционной емкостью в сравнении с рассмотренными материалами. Возможно, это связано со структурой носителей, так, например, отсевы угля имеют преимущество, связанное с наличием большого количества пор – адгезия осуществляется не только на поверхности носителя, но и в его макропорах. Предполагается, что доступ ионов стронция в поры с биомассой не будет затруднен, для подтверждения этого проведено исследование, демонстрирующее влияние клеток на изменение количества и размера пор отсевов угля БАУ (табл. 3).

Таблица 3

## Физико-химические свойства образцов

Наименование показателя	Ед. изм.	Отсевы угля до иммобилизации	Биосорбент
Удельная поверхность по методу много-точечного БЭТ	м <sup>2</sup> /г	630,10	633,40
Поверхность микропор	м <sup>2</sup> /г	721,40	718,80
Предельный объем сорбционного пространства	см <sup>3</sup> /г	0,3700	0,3721
Объем микропор	см <sup>3</sup> /г	0,2564	0,2555
Средний радиус пор	нм	1,175	1,175
Полуширина щели микропор	нм	0,633	0,597
Характеристическая энергия адсорбции	кДж/моль	20,523	21,777

Согласно полученным результатам исследования, основные показатели, характеризующие сорбционные свойства материала, изменяются незначительно при иммобилизации клеток. Стоит отметить также, что при иммобилизации на представленный носитель происходит увеличение

сорбционной емкости, следовательно, клетки выделенных бактерий не могут образовывать биопленок на данном носителе.

При очистке природной воды возможно влияние различных факторов на процесс биосорбции ионов металлов из модельных растворов, поэтому в ряде исследований было изучено влияние изменения температурного режима, водородного показателя среды, начальных концентраций ионов стронция и соотношения ионов  $Sr^{2+} : Ca^{2+}$ .

Предел водородного показателя выбран согласно свойствам выделенных бактерий, способных при жизнедеятельности подщелачивать среду (рН от 5 до 10). Выделенные клетки бактерий, согласно литературе, являются мезофилами, для которых оптимальные температуры роста составляют от 20 до 45 °С, в связи с этим был выбран соответствующий интервал варьирования температуры (25–45 °С) при исследовании биосорбции ионов стронция в присутствии конкурирующих ионов кальция.

Рассмотрено более подробно влияние трех факторов на степень очистки модельного раствора от ионов стронция (табл. 4).

Таблица 4

Факторы, их уровни и интервалы варьирования

Факторы	Нижний уровень	Верхний уровень	Основной уровень $z_0$
Значение рН ( $z_1$ )	5	10	7,5
Начальная концентрация ионов $Sr^{2+}$ ( $z_2$ ), мг-экв/л	0,2283	0,6848	0,4566
Соотношение ионов $Sr^{2+} : Ca^{2+}$ ( $z_3$ )	1 : 1	1 : 10	1 : 5

В рассматриваемом примере количество факторов  $k = 3$ . Число возможных комбинаций равно  $N = 2^k = 2^3 = 8$ . План ПФЭ (полнофакторный эксперимент) в безразмерном виде с результатами эксперимента приведен в табл. 5, где  $Y$  – средняя степень очистки раствора от ионов стронция, %.

Таблица 5

Параметры опытов для ПФЭ типа  $2^3$

Номер опыта	Факторы			Параметр оптимизации, %	
	Температура, °С	$[Sr^{+2}]$ , мг-экв/л	$[Ca^{+2}]$ , мг-экв/л	$y^o$	$y_p$
1	5	0,2283	0,2283	35,3	35,45
2	5	0,2283	2,2830	22,7	22,45
3	10	0,2283	0,2283	35,6	35,45
4	10	0,2283	2,2830	22,2	22,45
5	5	0,6848	0,6848	32,5	32,8
6	5	0,6848	6,8480	9,5	7,7
7	10	0,6848	0,6848	33,1	32,8
8	10	0,6848	6,8480	5,9	7,7

Пользуясь планом, представленным в табл. 6, определили коэффициенты линейного уравнения регрессии:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_0 y_0 = 24,6.$$

Аналогично получили  $b_1 = -0,4$ ;  $b_2 = -4,35$  и  $b_3 = -9,525$ ;  $b_{12} = -0,625$ ;  $b_{13} = -0,35$ ;  $b_{23} = -3,025$  и  $b_{123} = -0,425$ .

Таблица 6

Матрица планирования ПФЭ типа  $2^3$   
с учетом коэффициентов взаимодействия

Номер опыта	Факторы								Параметр оптимизации, %	
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{23}$	$x_{123}$	$y^p$	$y_p$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	35,3	35,45
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	22,7	22,45
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	35,6	35,45
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	22,2	22,45
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	32,5	32,8
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	9,5	7,7
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	33,1	32,8
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	5,9	7,7

Для оценки значимости коэффициентов рассчитали для опытов в центре плана следующие величины:

$$\bar{y}_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 y_u^0}{m} = 34,1,$$

$$S_{\text{вос}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^3 (y_u^0 - \bar{y}_0)^2}{m-1} = 2,51,$$

$$S_{bj} = \frac{S_{\text{вос}}}{\sqrt{N}} = 0,56.$$

Провели оценку значимости коэффициентов по критерию Стьюдента:

$$t_0 = \frac{|b_0|}{S_{b_0}} = 43,9.$$

Аналогично для остальных:

$$t_1 = 0,71; t_2 = 17,0; t_3 = 24,9; t_{12} = 1,1; t_{13} = 0,63; t_{23} = 5,4; t_{123} = 0,76.$$

Сравнивая полученные значения критериев Стьюдента с табличным значением ( $t = 4,3$ ), можно сделать вывод, что все коэффициенты, кроме  $b_1$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{13}$  и  $b_{123}$ , являются значимыми. Уравнение регрессии принимает следующий вид:

$$y = 24,6 - 4,35 x_2 - 9,525 x_3 - 3,025 x_2 x_3. \quad (1)$$

Проверка адекватности уравнения (1) по критерию Фишера показывает, что полученное значение критерия Фишера меньше табличного, следовательно, модель подобрана адекватно.

$$\sigma_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum (y_i^3 - y_i)^2}{f_{\text{ад}}} = 170,75,$$

$$\sigma_{\text{вос}}^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{f_{\text{вос}}} = 123,73,$$

$$F_{\text{кр}} = \frac{\sigma_{\text{ад}}^2}{\sigma_{\text{вос}}^2} = 1,38.$$

По результатам, полученным в ходе планирования, можно сделать вывод, что изменение водородного показателя в пределах от 5 до 10 не влияет на степень очистки воды от ионов стронция, так как коэффициент  $b_1$  не является значимым. Начальная концентрация ионов стронция в растворе оказывает большее влияние на степень очистки, чем концентрация конкурирующих ионов кальция в воде (в рамках представленного интервала варьирования концентраций).

Аналогично рассмотрено влияние температуры и начальных соотношений ионов  $\text{Sr}^{2+}:\text{Ca}^{2+}$  (табл. 7 и 8). На основании результатов исследования, были получены уравнения регрессии (2) и (3) соответственно.

Таблица 7

Факторы, их уровни и интервалы варьирования

Фактор	Нижний уровень	Верхний уровень	Основной уровень $z_0$
Значение температуры ( $z_1$ ), °C	25	45	35
Начальная концентрация ионов $\text{Sr}^{2+}$ ( $z_2$ ), мг-экв/л	0,2283	0,6848	0,4566
Соотношения ионов $\text{Sr}^{2+}:\text{Ca}^{2+}$ ( $z_3$ )	1 : 30	1 : 100	1 : 65

$$y = 27,092 - 0,399 x_2 - 4,339 x_3 - 0,337 x_2 x_3. \quad (2)$$

Как видно из уравнения регрессии (2), коэффициент при  $x_2$  больше, чем при  $x_3$ , следовательно, наибольшее влияние на степень очистки ока-

зывает начальная концентрация ионов стронция. Ввиду этого были увеличены начальные соотношения концентраций ионов металлов.

Таблица 8

## Факторы, их уровни и интервалы варьирования

Фактор	Нижний уровень	Верхний уровень	Основной уровень $z_0$
Значение температуры ( $z_1$ ), °C	25	45	35
Начальная концентрация ионов $\text{Sr}^{2+}$ ( $z_2$ ), мг-экв/л	0,2283	0,6848	0,4566
Соотношения ионов $\text{Sr}^{2+} : \text{Ca}^{2+}$ ( $z_3$ )	1 : 1	1 : 10	1 : 5

$$y = 41,946 - 12,129 x_2 - 4,004 x_3 - 0,108 x_2 x_3. \quad (3)$$

По результатам, полученным в ходе планирования, можно сделать вывод, что изменение температурного режима среды в пределах от 25 до 45 °C не влияет на степень очистки воды от ионов стронция, так как коэффициент  $b_1$  не является значимым.

При составлении математической модели, описывающей процесс биосорбции ионов стронция из раствора, установлено, что начальная концентрация конкурирующих ионов кальция в воде (в рамках интервала варьирования соотношений от 1:1 до 1:30) оказывает значительное влияние на степень очистки.

Результатами выполненных исследований являются выделенные и идентифицированные клетки бактерий, способные к селективной аккумуляции ионов стронция из растворов, применение которых в технологиях очистки воды позволяет извлекать ионы стронция из растворов и природных вод с высоким содержанием ионов кальция. Разработанная технология получения биосорбента на основе отсевов БАУ и бактерий рода *Acinetobacter* и изученные сорбционные свойства полученных материалов позволяют предложить биосорбционный метод очистки природной воды, содержащей высокие концентрации ионов стронция. С помощью метода многофакторного эксперимента изучено влияние внешних факторов на степень очистки модельных растворов от ионов стронция. По итогам исследования предложены дополнительные рекомендации, в частности: при использовании разработанного биосорбента следует предварительно проводить анализ концентраций ионов стронция и конкурирующих ионов кальция в воде. Выполнение рекомендации позволит контролировать степень очистки за счет перерасчета массы биосорбента, необходимого для извлечения ионов стронция. Таким образом, проблема очистки экосистем, содержащих избыточные ионы стронция, может быть решена непосредственно в условиях региона нахождения водоема.

### Библиографический список

1. Беспамятнов Г.П., Кротов Ю.А. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде: справ. – Л.: Химия, 1985. – 528 с.
2. Аномалии природного стронция в питьевых водах Калужской области / А.В. Ершов, И.И. Силин, Ю.С. Кривова, Т.И. Губарева // Вестник новых медицинских технологий. – 2006. – Т. XIII, № 4. – С. 161–164.
3. Пушников М.Ю. Очистка природных вод биосорбционным методом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.12.00 / НИИ ВОДГЕО. – М., 2000. – 10 с.
4. Физико-химические основы иммобилизации клеток методом сорбции / Е.И. Козляк, М.М. Якимов, И.Б. Уткин, И.С. Рогожин, З.Г. Соломон, А.М. Безбородов // Прикладная биохимия и микробиология. – 1991. – Т. 27, вып. 6. – С. 788–800.
5. Сазановец М.А., Игнатенко А.В. Анализ влияния микроорганизмов на адсорбцию тяжелых металлов алюмосиликатными сорбентами // Труды БГТУ. Биотехнология. – 2013. – № 4. – С. 48–50.
6. Самони В.В., Еликова Е.Е. Изучение закономерностей адсорбции бактериальных клеток на пористых носителях // Микробиология. – 2004. – Т. 73, № 6. – С. 810–816.
7. Слабова О.И., Никитин Д.И. Иммобилизация олиготрофных бактерий на пористых носителях методом сорбции // Микробиология. – 2005. – Т. 74, № 3. – С. 430–432.
8. Синтез и использование сорбционных материалов на основе вермикулита и микроорганизмов для извлечения стронция / О.И. Бахирева, Л.С. Пан, В.В. Вольхин, О.В. Белякова, М.С. Федорова // Вестник Пермского государственного технического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2010. – № 11. – С. 150–156.
9. Кацев А.М., Стародуб Н.Ф. Иммобилизация биолюминесцентных бактерий на неорганических носителях и оценка их применимости для биотестирования // Биотехнология. – 2009. – Т. 2, № 3. – С. 74–79.
10. Колесников В.П., Вильсон Е.В. Современное развитие технологических процессов очистки сточных вод в комбинированных сооружениях / под ред. В.К. Гордеева-Гаврикова. – Ростов н/Д: Юг, 2005. – 212 с.
11. Практикум по микробиологии: учеб. пособие / А.И. Нетрусов, М.А. Егорова, Л.М. Захарчук [и др.]. – М.: Академия, 2005. – 608 с.
12. Прунтова О.В., Сахно О.Н. Лабораторный практикум по общей микробиологии. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2005. – 76 с.
13. Методы почвенной микробиологии и биохимии: учеб. пособие / под ред. Д.Г. Звягинцева. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 304 с.
14. Чипо Масона, Ловенис Мапфейер, Стэнли Мапурази. Оценка накопления тяжелых металлов в сточных водах и почве, поглощение растениями кукурузы на ферме Ферл в Хараре // Журнал развития Зимбабве, Биндура, 2011. – С. 132–137.
15. Карни Е. Сорбция ионов ртути (II) на поверхности вермикулита. – Северо-Восточный университет Иллинойса, США, 2009. – С. 29–38.

### References

1. Bespamyatnov G.P., Krotov Yu.A. Predelno dopustimyye kontsentratsii himicheskikh veshchestv v okruzhayushey srede [Maximum permissible concentrations of chemical substances in the environment]. Leningrad, 1985, 528 p.
2. Ershov A.V., Silin I.I., Krivova Yu.S., Gubareva T.I. Anomalii prirodnogo strontsiya v pitevyih vodah Kaluzhskoy oblasti [Anomalies of natural strontium in drinking waters of the Kaluga region]. *Vestnik novyih meditsinskih tehnologiy*, 2006, vol. XIII, no. 4, pp. 161-164.
3. Pushnikov M.Yu. Ochistka prirodnykh vod biosorbtsionnym metodom [Purification of natural waters biosorptional method]. Abstract of Ph.D. thesis. Moscow, 2000, 10 p.
4. Kozlyak E.I., Yakimov M.M., Utkin I.B., Rogozhin I.S., Solomon Z.G., Bezborodov A.M. Fiziko – himicheskie osnovy immobilizatsii kletok metodom sorbsitsii [Physico – chemical fundamentals of cell immobilization by the method of sorption]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 1991, vol. 27, no. 6, pp. 788-800.

5. Sazanovets M.A., Ignatenko A.V. Analiz vliyaniya mikroorganizmov na adsorbtsiyu tyazhyolyih metallov alyumosilikatnyimi sorbentami [Analysis of the influence of microorganisms on adsorption of heavy metals with aluminosilicate sorbents]. *Biotehnologiya, trudyi BGTU*, 2013, no. 4, pp. 48–50.

6. Samoni V.V., Elikova E.E. Izuchenie zakonomernostey adsorbtsii bakterialnykh kletok na poristykh nositelyah [Study of the regularities of adsorption of bacterial cells on porous media]. *Mikrobiologiya*, 2004, vol. 73, no. 6, pp. 810-816.

7. Slabova O.I., Nikitin D.I. Immobilizatsiya oligotrofnih bakteriy na poristykh nositelyah metodom sorbtsii [Immobilization of oligotrophic bacteria in porous media by the method of sorption]. *Mikrobiologiya*, 2005, vol. 74, no. 3, pp. 430-432.

8. Bahireva O.I., Pan L.S., Volhin V.V., Belyakova O.V., Fedorova M.S. Sintez i ispolzovanie sorbtsionnykh materialov na osnove vermikulita i mikroorganizmov dlya izvlecheniya strontsiya [Synthesis and use of sorption materials based on vermiculite and micro-organisms to extract strontium]. *Vestnik PNIPU*, 2010, no. 11, pp. 150-156.

9. Katsev A. M., Starodub N. F. Immobilizatsiya bioluminescentnykh bakteriy na neorganicheskikh nositelyah i otsenka ih primenimosti dlya biotestirovaniya [Immobilization of bioluminescent bacteria on inorganic carriers and evaluation of their applicability for bioassay]. Simferopol, *Biotehnologiya*, 2009, vol. 2, no 3, pp. 74-79.

10. Kolesnikov V.P., Vilson E.V. Sovremennoe razvitiye tehnologicheskikh protsessov oчитki stochnykh vod v kombinirovannykh sooruzheniyah [Modern development of technological processes of sewage treatment in combined works]. Rostov-on-Don, Yug, 2005, 212 p.

11. Netrusov A.I., Egorova M.A., Zaharchuk L.M. et al. Praktikum po mikrobiologii [Workshop on Microbiology]. Moscow, *Akademiya*, 2005, 608 p.

12. Pruntova, O.V. Laboratorniy praktikum po obschey mikrobiologii [A laboratory course in General Microbiology]. Vladimir, VGU, 2005, 76 p.

13. Zvyagintseva D.G. Metody pochvennoy mikrobiologii i biohimii [Methods of soil Microbiology and biochemistry]. Moscow, MGU, 1991, 304 p.

14. Chipu Masona, Lovenis Mapfeyer, Stenli Mapurazi. Mapfare, Stenly Mapurazi. Otsenka nakopleniya tyazhelykh metallov v stochnykh vodah i pochve, pogloschenie rasteniyami kukuruzyi na ferme Ferl v Harare. Zimbabwe, Bindura, 2011, pp. 132-137.

15. Karni E. Sorbtsiya ionov rtuti (II) na poverhnosti vermikulita [Sorption of mercury ions (II) on the surface of the vermiculite]. USA, Severo-Vostochniy Universitet Illinoysa, 2009, pp. 29-38.

Получено 4.07.2017

**A. Ananko, O. Bakhireva, E. Farberova, L. Pan**

## **DEVELOPMENT OF A BIOSORPTION METHOD OF PURIFICATION OF NATURAL WATER FROM STRONTIUM IONS**

In this paper the urgent problem of cleaning water ecosystems contaminated with strontium ions, in particular, the rivers of the central part of Russia and the Perm Krai has been considered. From the waters of the Sylva River (Kungur, Perm Krai), bacterial cells have been isolated that have the ability to accumulate mainly strontium ions from model solutions. To reduce material costs when separating bacterial cells from contaminated water, their immobilization to porous carriers was carried out. Comparison of the sorption capacities of the raw materials and finished biosorbents allows concluding that the capacity and selectivity of the obtained biosorbents is bigger.

Based on the methods of multifactor experiment, in the paper a study of the influence of the most significant factors on the biosorption process is given. According to the conducted studies, a slight temperature variation does not affect the efficiency of purification of the model solution from strontium ions, which was chosen as an optimization parameter. Changes in the values of the hydro-

gen index of the medium are also not considered significant, that is why when carrying out purification of natural water on an industrial scale, it is necessary to control the initial concentrations of strontium ions and competing calcium ions to maintain the purification efficiency at a high level.

**Keywords:** strontium ions, microorganisms, immobilization of cells, porous natural carriers, multifactor experiment, biosorption purification method.

**Ананко Елена Андреевна** (Пермь, Россия) – магистрант Пермского национального исследовательского университета (614990, г. Пермь, ул. Комсомольский пр., 29, e-mail: alena.ananko@mail.ru).

**Бахирева Ольга Ивановна** (Пермь, Россия) – канд. хим. наук, доцент кафедры «Химия и биотехнология», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, ул. Комсомольский пр., 29, e-mail: bahirevy@mail.ru).

**Фарберова Елена Абрамовна** (Пермь, Россия) – канд. хим. наук, доцент кафедры «Химия и биотехнология», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, ул. Комсомольский пр., 29).

**Пан Лариса Сергеевна** (Пермь, Россия) – канд. хим. наук, доцент кафедры «Химия и биотехнология», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, ул. Комсомольский пр., 29).

**Ananko Alena** (Perm, Russian Federation) – Master of the Perm National Research University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: alena.ananko@mail.ru).

**Bakhireva Olga** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Associate Professor of Department "Chemistry and biotechnology", Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: bahirevy@mail.ru).

**Farberova Elena** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Associate Professor of Department "Chemistry and biotechnology", Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29).

**Pan Larisa** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Associate Professor of Department "Chemistry and biotechnology", Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29).