



## Возможность применения иммобилизованных дрожжей для биосорбции тяжелых металлов из водных сред

*А. Ю. Муравьева, А. А. Степачёва✉, В. П. Молчанов*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет», г. Тверь, Россия,  
e-mail: [a.a.stepacheva@mail.ru](mailto:a.a.stepacheva@mail.ru)

Поступила в редакцию: 16.10.2020 г., после доработки: 16.11.2020 г., принята в печать: 30.11.2020 г.

**Аннотация** – Рассмотрена возможность использования биосорбции микроорганизмами как один из вариантов решения проблемы очистки сточных вод от тяжелых металлов, представляющих серьезную опасность, учитывая их высокую токсичность и способность накапливаться в живых организмах. Представлены результаты исследований по извлечению четырех типов ионов тяжелых металлов (Co(II), Cu(II), Ni(II), Cr(III)) из водных растворов культурами дрожжей, иммобилизованных на диоксиде кремния и альгинатном геле. Показано, что *Saccharomyces cerevisiae*, иммобилизованные на диоксиде кремния адсорбционным методом в оптимальных условиях позволяют сорбировать до 75% ионов меди, 90% ионов кобальта и никеля и 60% ионов хрома, сохраняя эффективность своей работы как минимум в трех последовательных циклах. При этом применение сшивающего агента (глутарового альдегида) обеспечивало повышение эффективности биосорбции на 3–5%. Таким образом, полученные результаты подтверждают, что иммобилизация микроорганизмов адсорбционным методом является перспективным методом для применения в биологической очистке воды от ионов тяжелых металлов.

*Ключевые слова:* тяжелые металлы, биосорбция, дрожжи, иммобилизация.

---

### Technologies for elimination of chemical hazards

## Feasibility of using immobilized yeast for biosorption of heavy metals from aqueous media

*Anna Yu. Muravieva, Antonina A. Stepacheva✉, and Vladimir P. Molchanov*

Tver State Technical University, Tver, Russia, e-mail: [a.a.stepacheva@mail.ru](mailto:a.a.stepacheva@mail.ru)

Received: October 16, 2020, Revised: November 16, 2020, Accepted: November 30, 2020

**Abstract** – The paper highlights a feasibility of using microorganisms-mediated biosorption as one of the options for solving the problem of wastewater treatment from heavy metals, which pose a serious hazard due to their high toxicity and ability for accumulation in living organisms. The

results of studies are presented dealing with the extraction of four types of heavy metal ions (Co(II), Cu(II), Ni(II), Cr(III)) from aqueous solutions by yeast cultures immobilized on silicon dioxide and alginate gel. It has been shown that *Saccharomyces cerevisiae* immobilized on silicon dioxide by the adsorption method can absorb up to 75% of copper(II) ions, 90% of cobalt(II) and nickel(II) ions, and 60% of chromium(III) ions under optimal conditions, while maintaining the proper efficiency in at least three successive cycles. At the same time, the use of a crosslinking agent (glutaric aldehyde) provides an increase in the efficiency of biosorption by 3–5%. Thus, the results obtained confirm that the immobilization of the microorganisms by the adsorption method is a promising approach which can be used in biological water purification from heavy metal ions.

*Keywords:* heavy metals, biosorption, yeast, immobilization.

---

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами рассматривается в качестве одной из наиболее серьезных проблем, с которыми сталкивается человеческое общество во всем мире [1, 2]. Водные среды обитания, особенно пресноводные экосистемы, более подвержены загрязнению из-за использования воды в промышленных процессах, а также сброса сточных вод промышленных предприятий и коммунального хозяйства [3–5]. Попадая в водоем, тяжелые металлы способны накапливаться в донных отложениях, а при попадании в почву или грунтовые воды они могут включаться в пищевые цепи на любом уровне. Особенно важно, что многие тяжелые металлы отличаются высоким токсическим действием [6, 7].

Тяжелые металлы поступают в водную экосистему, как из природных, так и из антропогенных источников [8]. Важными природными источниками являются вулканическая активность, выветривание горных пород, эрозия почв и лесные пожары. К антропогенным источникам относятся: промышленные, бытовые и городские ливневые стоки и деятельность нефтяной, химической и других видов промышленности (Таблица 1).

При определенных условиях окружающей среды загрязняющие вещества могут накапливаться до токсичных концентраций и наносить экологический ущерб. Согласно ГОСТ 17.4.1.0283, As, Cd, Pb, Hg и Zn это пять элементов, относящихся к первому классу опасности. Содержащие эти элементы вещества обладают наибольшим потенциально опасным воздействием среди химических веществ, которые попадают в окружающую среду в повышенных концентрациях в результате деятельности человека, особенно учитывая их способность накапливаться и биологическую роль [9].

Установлено, что ионы металлов взаимодействуют с компонентами клеток живых организмов, такими как ДНК и ядерные белки, вызывая повреждение ДНК и конформационные изменения, которые могут привести к модуляции клеточного цикла, канцерогенезу или апоптозу [10, 13]. Несколько исследований показали, что мышьяк [14, 15], кадмий [16], хром [17], свинец [18, 19] и ртуть [20], являясь активными окислителями, приводят к увеличению концентрации активных форм кислорода в клетках и развитию окислительного стресса. В связи с высокой токсичностью указанных элементов задача их удаления из водных сред является одной из наиболее приоритетных.

**Таблица 1.** Потенциальные антропогенные источники загрязнения водных объектов тяжелыми металлами

**Table 1.** Potential anthropogenic sources of water bodies pollution with heavy metals

Металл	Источник
Fe	Лакокрасочная, металлургическая, топливная и текстильная промышленность
Mn, Zn	Производство стекла, пестицидов, электрохимическая, металлургическая, лакокрасочная, топливная и текстильная промышленность
Pb	Производство стекла, пестицидов, электрохимическая, лакокрасочная, топливная и текстильная промышленность
Cd	Производство стекла, пестицидов, электрохимическая, лакокрасочная, топливная и текстильная промышленность
Ni	Производство стекла, катализаторов, пестицидов, лакокрасочная, электрохимическая, топливная и текстильная промышленность
Cu	Производство стекла, катализаторов, пестицидов, лакокрасочная, электрохимическая, топливная и текстильная промышленность
Cr	Производство катализаторов, металлургическая, электрохимическая, лакокрасочная и текстильная промышленность

Биологическая очистка сточных вод, применяемая как обязательный этап на станциях очистки воды, основана на биологических процессах с участием микроорганизмов [21–23]. Для извлечения металлов из сточных вод наиболее часто используется их биосорбция различными микроорганизмами [24]. Бактерии, грибки, дрожжи и водоросли могут извлекать тяжелые металлы и радионуклиды из водных растворов в значительных количествах. Микроорганизмы обладают способностью к биосорбции клеточными стенками и аккумуляции металлов внутри клетки. После выдержки в очищаемом растворе, микроорганизмы извлекаются, а токсичные металлы подвергаются дезактивации [25]. Среди бактерий высокий биосорбционный потенциал показали *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Rhodobacter sphaeroides*, *Alcaligenes eutrophus*, *Staphylococcus saprophyticus* и др. [26–28]. Грибковая биомасса также проявляет эффективность в биосорбции благодаря высокому содержанию материала клеточной стенки, который имеет отличную способность связывать металлы. Биомасса *Aspergillus niger* [29], *Penicillium spinulosum* [30, 31], *Penicillium chrysogenum* [32], *Phanerochaete chrysosporium* [33] успешно применялись для сорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Au}^{3+}$ ,  $\text{Ag}^+$ .

Дрожжи являются микроорганизмами, которые относятся к одноклеточным грибам. При этом дрожжи являются дешевым и легкодоступным биоматериалом, который может применяться не только для пищевых, но и для экологических целей. Использование дрожжей в качестве биосорбентов было рассмотрено различными исследователями. Наибольшее число исследований посвящено использованию *Saccharomyces cerevisiae* для биосорбции таких металлов, как Ag, Au, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, U, Th, Zn из водных растворов в широком диапазоне концентраций [34–37].

Солопов и соавторы сообщили о возможности биосорбции ионов меди, железа и никеля с использованием культуры *Saccharomyces cerevisiae*, модифицированной магнетитом. Полученная ими система обеспечивала 85–100% сорбции за 30 мин при начальных концентрациях металлов 200, 50 и 60 мг/л, соответственно [38].

Аронбаев изучал биосорбцию меди, кадмия и свинца с помощью *Saccharomyces cerevisiae* [39, 40] и клеточных стенок дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, иммобилизованных на альгинатные гели [41]. Было показано, что максимальная сорбционная емкость нативных клеточных стенок дрожжей составляет: Cu – 25,60 мг/г; Cd – 34,48 мг/г; Pb – 125,0 мг/г. Эффективность сорбции для иммобилизованных клеточных стенок составила 100% при начальной концентрации ионов тяжелых металлов 20,0 г/л.

Патент RU2509734 описывает биосорбцию ионов цинка, никеля и меди культурой *Saccharomyces cerevisiae*. Эффективность очистки составила 98% для цинка и 75% для меди и никеля при начальной концентрации 20,0–100,0 мг/л [42].

Гаранин исследовал биосорбцию цинка, меди и никеля культурами пивоваренных дрожжей. Было найдено, что живые дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* способны снижать концентрацию тяжелых металлов в 75, 15 и 6 раз, соответственно [43].

Горбцом и др. был изучен процесс биосорбции ионов меди дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* с использованием стальных электродов в постоянном магнитном поле. Исследования показали увеличение эффективности биосорбции ионов меди с начальной концентрацией 50,0 мг/л до 99% при действии магнитного поля в присутствии электродов, тогда как чистые культуры дрожжей извлекали лишь 37% ионов металла [44]. Таким образом, анализ исследований в данной области показывает, что использование микроорганизмов для извлечения ионов тяжелых металлов из сточных промышленных вод имеет широкие перспективы.

В настоящее время применение иммобилизованных биологических объектов в промышленных или экологических целях является актуальной задачей и темой многих исследований. Нанесение и закрепление биологического материала позволяет использовать его свойства в течение нескольких циклов без существенной потери биологической активности. Выбор носителя для дрожжевых клеток обусловлен следующими критериями: развитая поверхность, механическая прочность, длительный период действия, нерастворимость в реакционной среде, высокая гидрофильность, химическая и биологическая устойчивость, возможность к регенерации и доступность. В качестве носителей для микроорганизмов используют пористые неорганические (уголь, керамика, стекло, силикаты), органические (целлюлоза, клетчатка) и гелеобразующие (желатин, альгинаты, пектин, хитозан) материалы [45].

Целью данного исследования явилось сравнение сорбционной способности пекарских (*Saccharomyces cerevisiae*) и пивоваренных

(*Saccharomyces carlsbergensis*) дрожжей, иммобилизованных на диоксиде кремния и в альгинатном геле, для извлечения ионов  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### *Приготовление культуры дрожжевых клеток*

В данной работе использовались культуры дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* (500–50000 КОЕ, Supelco, США) и *Saccharomyces carlsbergensis* (500–50000 КОЕ, Supelco, США). Культуры дрожжей были приготовлены следующим образом. Навеска дрожжей с концентрацией 5,0 г/л помещалась в коническую колбу с питательным раствором, содержащим сахарозу (хч, Реахим, Россия) с концентрацией 10,0 г/л, сульфат аммония (хч, Реахим, Россия) с концентрацией 5,0 г/л. Колба помещалась в водяную баню и выдерживалась при температуре 30°C в течение 24 ч.

### *Иммобилизация дрожжевых клеток*

В целях исследования возможности многократного применения дрожжей для сорбции ионов металлов была проведена иммобилизация *Saccharomyces cerevisiae* и *Saccharomyces carlsbergensis* на диоксиде кремния и в альгинатном геле.

### *Иммобилизация дрожжевых клеток на оксиде кремния*

Иммобилизация культур дрожжей на оксиде кремния проводилась в двух вариантах: вариант 1 - адсорбционным методом; вариант 2 - с дополнительным ковалентным связыванием. В варианте 1 иммобилизация на немодифицированном носителе выполнялась с использованием легкокипящего органического растворителя – хлороформа (осч, Реахим, Россия). Для этого 5 г дрожжей, 5 г носителя – безводного диоксида кремния (осч, ЛенРеактив, Россия) – смешивали с 30 мл хлороформа. Суспензию выдерживали при температуре 20°C в течение 12 ч и затем растворитель выпаривали при нагревании до 40°C. Полученный образец сушили при температуре 50°C. В варианте 2 иммобилизация проводилась с предварительной модификацией оксида кремния глутаровым альдегидом (далее ГА) (99%, Sigma Aldrich, США) в фосфатном буферном растворе (pH = 7,0). Для иммобилизации 5 г оксида кремния смешивали в течение 1 ч с 5 г культуры дрожжей и 2%-ным раствором глутарового альдегида (30 мл) в фосфатном буфере. После отделения твердая фаза высушивалась при температуре 70°C до постоянной массы.

### *Иммобилизация дрожжевых клеток в альгинатном геле*

Иммобилизация клеток дрожжей в альгинатном геле проводилась следующим образом: 5 г дрожжей суспендировались в 20 мл 5%-ного раствора альгината натрия (99%, Sigma Aldrich, США). Затем полученная суспензия распылялась на стекле совместно с 1%-ным раствором хлорида кальция (хч, Реахим, Россия).

### *Методика биосорбции металлов*

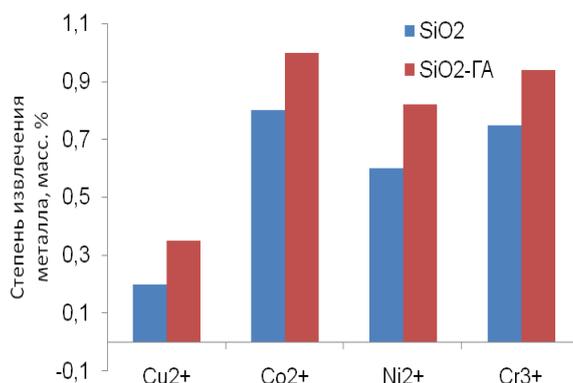
Для исследования биосорбции использовались следующие растворы солей:  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (ч, Реахим, Россия),  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (ч, Реахим, Россия),  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (ч, Реахим, Россия),  $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (ч, Реахим, Россия). В эксперименте по биосорбции 10 мл раствора соли с концентрацией ионов

металла 0,1 моль/л выдерживались при постоянном перемешивании со скоростью 100 об/мин при 30°C с 0,5 г образца иммобилизованных дрожжей в течение 60 мин. После биосорбции проба отфильтровывалась. Концентрация ионов металлов измерялась спектрофотометрически с использованием УФ-спектрофотометра ПЭ2800 (Экрос, Россия). Измерение проводилось при длинах волн 475, 590, 625 нм в зависимости от типа иона.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Влияние типа носителя на биосорбцию металлов*

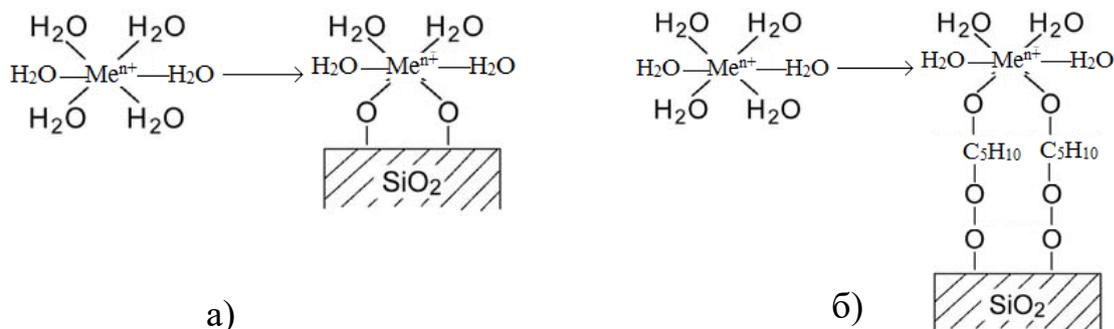
В целях определения влияния типа носителя на биосорбцию металлов были проведены исследования с образцами носителя без дрожжевых клеток. Результаты исследования представлены на рисунке 1.



**Рис. 1.** Влияние типа носителя на сорбцию ионов металлов.

**Fig. 1.** Influence of support type on the metal ion sorption.

Из рисунка 1 видно, что диоксид кремния вносит определенный вклад в сорбцию металлов (до 1 масс. %). Сорбция металлов происходит за счет связывания гидратированных ионов с ОН-группами на поверхности диоксида кремния, согласно рисунку 2 [34]. При этом более высокой сорбционной емкостью обладает носитель, модифицированный ГА, за счет наличия центров дополнительного связывания ионов металлов (как показано на рис. 2б).

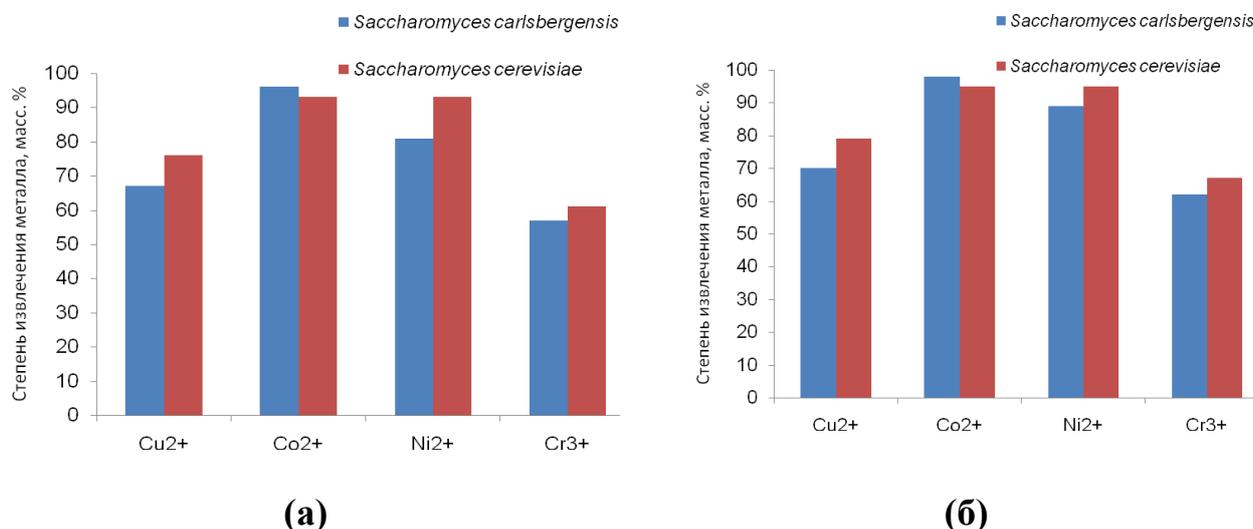


**Рис. 2.** Схема сорбции ионов металлов на поверхности (а) SiO<sub>2</sub>; (б) SiO<sub>2</sub>-ГА.

**Fig. 2.** Scheme of metal ion sorption on the surface of (a) SiO<sub>2</sub>; (b) SiO<sub>2</sub>-GA.

**Биосорбция ионов металлов с использованием иммобилизованных дрожжей**

Результаты определения возможности использования дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* и *Saccharomyces carlsbergensis*, иммобилизованных на диоксиде кремния, для биосорбции ионов металлов представлены на рисунке 3.

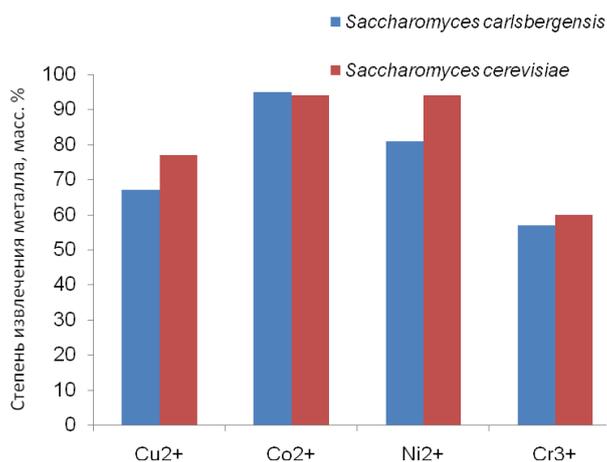


**Рис. 3.** Биосорбция ионов металлов с использованием культур дрожжей, иммобилизованных на (а) SiO<sub>2</sub>; (б) SiO<sub>2</sub>-ГА.

**Fig. 3.** Biosorption of metal ions using yeasts immobilized on (a) SiO<sub>2</sub>; (b) SiO<sub>2</sub>-GA.

Из рисунка 3 видно, что иммобилизованные *Saccharomyces cerevisiae* проявляют более высокую эффективность в биосорбции ионов металлов Cu<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, по сравнению с иммобилизованной культурой *Saccharomyces carlsbergensis*. Сравнительный анализ результатов биосорбции ионов металлов с использованием культур дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* и *Saccharomyces carlsbergensis*, иммобилизованных на немодифицированном и модифицированном оксиде кремния, показал, что использование сшивающего агента при иммобилизации культур дрожжей позволяет повысить эффективность биосорбции на 3–5%. Подобный эффект, вероятно, связан с наличием на поверхности образца не только молекул биосорбентов, но и дополнительных центров сорбции металлов – гидратированных поверхностных групп оксида кремния и групп ГА. Однако эффективность использования микроорганизмов, иммобилизованных на поверхности оксида кремния, адсорбционным методом также достаточно высокая – на 1–3% ниже по сравнению с образцами, полученными при ковалентной сшивке.

Исследования показали, что иммобилизация микроорганизмов, в частности дрожжей, в гелях приводит к увеличению активности клеток [41, 42, 46–49]. При этом не происходит нарушения их способности к размножению. Одним из основных преимуществ использования гелевых носителей является возможность их разрушения для контроля состояния и концентрации клеток дрожжей. Рисунок 4 показывает результаты биосорбции ионов металлов образцами дрожжей, иммобилизованных в альгинатном геле.



**Рис. 4.** Биосорбция ионов металлов с использованием дрожжей, иммобилизованных в альгинатном геле.

**Fig. 4.** Biosorption of metal ions using yeasts immobilized on alginate gel.

Как видно из представленных данных, эффективность биосорбции ионов металлов культурами дрожжей, иммобилизованных в альгинатном геле, сопоставима с эффективностью биосорбции для образцов, иммобилизованных на немодифицированном оксиде кремния. Однако было отмечено, что сам альгинатный гель практически не проявляет сорбционной активности. Таким образом, иммобилизация дрожжей в матрице альгинатного геля повышает активность микроорганизмов к биосорбции ионов металлов.

#### ***Сравнение стабильности биосорбции иммобилизованных дрожжей***

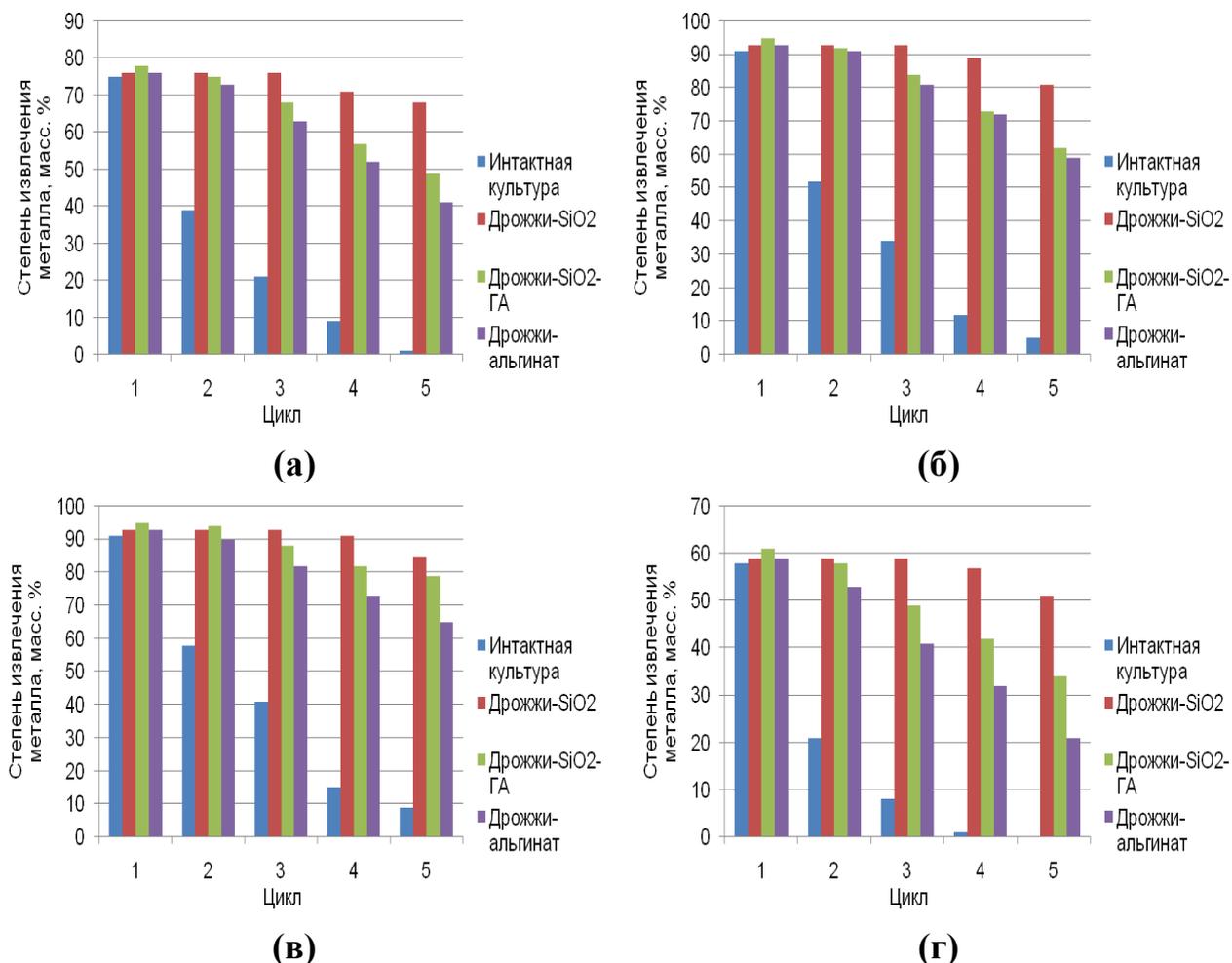
Иммобилизация микроорганизмов проводится, как правило, с целью их повторного использования и более легкого отделения от реакционной среды. Для того чтобы изучить стабильность работы иммобилизованных микроорганизмов, была проведена серия опытов по извлечению ионов металлов из растворов при многократном использовании образцов дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*.

При каждом цикле образцы иммобилизованных микроорганизмов обрабатывались 0,01 М раствором уксусной кислоты для удаления сорбированных ионов. Результаты многократной биосорбции представлены на рисунке 5.

Как видно из рисунка 5, уже при втором использовании интактной культуры дрожжей происходит падение эффективности биосорбции почти в 2 раза, что связано с: (1) потерями в массе культуры, и (2) снижением биосорбционной емкости клеток дрожжей. На 4–5 цикле интактная культура практически не проявляет биосорбционной эффективности.

Многократное использование дрожжей, иммобилизованных на модифицированном оксиде кремния, показало, что, начиная с третьего цикла, эффективность биосорбции снижается, в среднем, на 10% за каждый цикл. Это может быть связано с разрушением/вымыванием ГА с поверхности оксида кремния при обработке образца раствором уксусной кислоты, а, следовательно,

с дальнейшим вымыванием клеток *Saccharomyces cerevisiae*. Тот же эффект наблюдался при многократном использовании дрожжей, иммобилизованных в альгинатном геле. Нужно отметить, что при обработке данного образца раствором уксусной кислоты визуально наблюдалась деформация частиц альгинатного геля, что указывает на разрушение его структуры.



**Рис. 5.** Многократная биосорбция ионов (а) меди, (б) кобальта, (в) никеля, (г) хрома с использованием иммобилизованных образцов дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*.

**Fig. 5.** Multiple biosorption of (a) copper, (b) cobalt, (c) nickel, (d) chromium ions using immobilized *Saccharomyces cerevisiae*.

Образец дрожжей, иммобилизованных на немодифицированном оксиде кремния, показал стабильность своей работы минимум в трех повторных циклах, а последующее двукратное его применение снижало эффективность биосорбции не более, чем на 10%. По-видимому, в этом случае не происходит разрушения структуры носителя и вымывания дрожжей, т.е. можно заключить, что иммобилизация микроорганизмов адсорбционным методом является наиболее оптимальной в целях их применения для биологической очистки воды от ионов тяжелых металлов. Кроме того, примененный в данном исследовании носитель является достаточно дешевым и прочным материалом, что позволит снизить затраты на проведение биосорбции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе показана возможность использования иммобилизованных культур дрожжей *Saccharomyces* в биосорбции ионов тяжелых металлов из водных растворов. Применение *Saccharomyces cerevisiae*, иммобилизованных на диоксиде кремния, позволяет извлекать до 75% ионов меди, 90% ионов кобальта и никеля и 60% ионов хрома. Использование сшивающего агента – глутарового альдегида - при иммобилизации культур дрожжей на диоксиде кремния позволяет повысить эффективность биосорбции на 3–5%, однако эффективность использования микроорганизмов, иммобилизованных на поверхности диоксида кремния, адсорбционным методом также достаточно высокая.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что эффективность биосорбции ионов металлов культурами дрожжей, иммобилизованных в альгинатном геле сопоставима с эффективностью биосорбции для образцов, иммобилизованных на немодифицированном диоксиде кремния. Таким образом, можно сделать вывод, что иммобилизация микроорганизмов адсорбционным методом является наиболее оптимальной в целях их применения для биологической очистки воды от ионов тяжелых металлов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №18-08-00460.*

## ACKNOWLEDGEMENT

*The work was supported by the grant of Russian Fund for Basic Research (Project No. 18-08-00460).*

## Список литературы:

1. Leoni L., Sartori F. (1996). Heavy metals and arsenic in sediments from the continental shelf of the Northern Tyrrhenian. Eastern Ligurian Seas. *Marine environmental research*, 41(1), 73 - 98. [https://doi.org/10.1016/0141-1136\(94\)00153-7](https://doi.org/10.1016/0141-1136(94)00153-7)
2. Mendil D., Uluözlu Ö.D. (2007). Determination of trace metal levels in sediment and five fish species from lakes in Tokat, Turkey. *Food Chemistry*, 101(2), 739 - 745. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.01.050>
3. Demirak A., Yilmaz F., Levent Tuna A., Ozdemir N. (2006). Heavy metals in water, sediment and tissues of *Leuciscus cephalus* from a stream in southwestern Turkey. *Chemosphere*, 63(9), 1451 - 1458. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.09.033>
4. Fernandes C., Fontainhas-Fernandes A., Peixoto F., Salgado M.A. (2007). Bioaccumulation of heavy metals in *Liza saliens* from the Esmoriz – Paramos coastal lagoon, Portugal. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 66(3), 426 - 431. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2006.02.007>
5. Vardhan K.H., Kumar P.S., Panda R.C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 290, 111197. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197>
6. Loska K., Wiechuła D. (2004). Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, 51(8), 723 - 733. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00187-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00187-5)

7. Sankhla M.S., Kumari M., Nandan M. Kumar R., Agrawal P. (2016). Heavy metals contamination in water and their hazardous effect on human health - a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Science*, 5(10), 759 - 766. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3428216>
8. Biney C., Amuzu F., Calamari D., Kaba N., Mbome I. (1994). Review of heavy metals in the African aquatic environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 28(2), 134 - 159. <https://doi.org/10.1006/eesa.1994.1041>
9. Alloway B.J. (2004). *Heavy metals in soils*. Netherlands: Springer.
10. Tchounwou P.B., Centeno J.A., Patlolla A.K. (2013). Arsenic toxicity, mutagenesis and carcinogenesis – a health risk assessment and management approach. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 255(1-2), 47 - 55. <https://doi.org/10.1023/B:MCBI.0000007260.32981.b9>
11. Yedjou C.G. (2008). Oxidative stress in human leukemia cells (HL-60), human liver carcinoma cells (HepG2) and human Jerkat-T cells exposed to arsenic trioxide. *Metal Ions in Biology and Medicine*, 9, 298 - 303.
12. Ершов Ю.А., Плетнева Т.В. (1989). *Механизмы токсического действия неорганических соединений*. М.: Медицина.
13. Скугорева С.Г., Ашихмина Т.Я., Фокина А.И., Лялина Е.И. (2016). Химические основы токсического действия тяжелых металлов (обзор). *Теоретическая и прикладная экология*, 1, 4 - 13.
14. Tchounwou P.B., Ishaque A.B., Schneider J. (2012). Cytotoxicity and transcriptional activation of stress genes in human liver carcinoma cells (HepG<sub>2</sub>) exposed to cadmium chloride. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 222(1-2), 21 - 28. <https://doi.org/10.1023/A:1017922114201>
15. Patlolla A., Barnes C., Yedjou C., Velma V. (2009). Oxidative stress, DNA damage and antioxidant enzyme activity induced by hexavalent chromium in Sprague Dawley rats. *Environmental toxicology*, 24(1), 66 - 73. <https://doi.org/10.1002/tox.20395>
16. Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Foxx D., Ishaque A., Shen E. (2001). Lead-induced cytotoxicity and transcriptional activation of stress genes in human liver carcinoma cells (HepG<sub>2</sub>). *Molecular and cellular biochemistry*, 255(1-2), 161 - 170. <https://doi.org/10.1023/A:1017922114201>
17. Sutton D.J. (2012). Mercury induces the externalization of phosphatidylserine in human proximal tubule (HK-2) cells. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 4(2), 138 - 144. <https://doi.org/10.3390/ijerph2007040008>
18. Hamer D.H. (1986). Metallothioneins. *Annual Review of Biochemistry*, 55, 913 - 951. <https://doi.org/10.1146/annurev.bi.55.070186.004405>
19. Norheim G. (1987). Levels and interactions of heavy metals in seabirds from Svalbard and the Antarctic. *Environmental Pollution*, 47, 83 - 94. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(87\)90039-X](https://doi.org/10.1016/0269-7491(87)90039-X)
20. Davis J.M., Russel R. (1988). The influence of dissolved selenium compounds on the accumulation of inorganic and methylated mercury compounds from solution by the mussel *Mytilus edulis* and the plaice *Pleuronectes platessa*. *Science of the Total Environment*, 68, 197 - 205. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(88\)90372-5](https://doi.org/10.1016/0048-9697(88)90372-5)
21. Coronelli T.V. (1996). Principles and methods for raising the efficiency of biological degradation of carbohydrates in the environment. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 32(6), 579 - 585.
22. Калюжный С.В. (2004). Высокоинтенсивные анаэробные биотехнологии очистки промышленных сточных вод. *Катализ в промышленности*, 6, 42 - 50.
23. Weijma J., Copini C.F.M., Buisman C.J.N., Schultz C.E. (2002). *Biological recovery of metals, sulfur and water in the mining and metallurgical industry*. In: *Water recycling and resource recovery in industry : analysis, technologies and implementation*. IWA: London.
24. Uslu G., Tanyol M. (2006). Equilibrium and thermodynamic parameters of single and binary mixture biosorption of lead and copper ions onto *Pseudomonas putida*. Effect of temperature. *Journal of Hazardous Materials*, 135, 87 - 93. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.029>

25. Gadd G.M. (1990). Heavy metal accumulation by bacteria and other microorganisms. *Experientia*, 46, 834 - 840.
26. He J., Chen J.P. (2014). A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: Materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. *Bioresource Technology*, 160, 67 - 78. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.068>
27. Tunali A.A. (2006). Removal of lead and copper ions from aqueous solutions by bacterial strain isolated from soil. *Chemical Engineering Journal*, 115, 203 - 211. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2005.09.023>
28. Naz T., Khan M., Ahmed I., Rehman S., Rha E., Malook I., Jamil M. (2016). Biosorption of heavy metals by *Pseudomonas* species isolated from sugar industry. *Toxicology and Industrial Health*, 32, 1619 - 1627. <https://doi.org/10.1177/0748233715569900>
29. Dursun A.Y., Uslu G., Cuci Y., Aksu Z. (2003). Bioaccumulation of copper(II), lead(II) and chromium(VI) by growing *Aspergillus niger*. *Process Biochemistry*, 38, 1647 - 1651. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00075-4)
30. Cabuk A., Ilhan S., Filik C., Caliskan F. (2005). Pb<sup>2+</sup> biosorption by pretreated fungal biomass. *Turkish Journal of Biology*, 29, 23 - 28.
31. Say R., Yimaz N., Denizli A. (2003). Removal of heavy metal ions using the fungus *Penicillium canescens*. *Adsorption Science Technology*, 21, 643 - 650.
32. Tan T.W, Hu B., Su H.J. (2004). Adsorption of Ni<sup>2+</sup> on amine-modified mycelium of *Penicillium chrysogenum*. *Enzyme Microbiology and Technology*, 35, 508 - 513. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2004.08.035>
33. Day R., Denizli A., Arica M.Y. (2001). Biosorption of cadmium(II), lead(II) and copper(II) with the filamentous fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Bioresource Technology*, 76, 67 - 70. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00071-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00071-7)
34. Ozer A., Ozer D. (2003). Comparative study of the biosorption of Pb(II), Ni(II) and Cr(VI) ions onto *S. cerevisiae*: determination of biosorption heats. *Journal of Hazardous Materials*, 100, 219 - 229. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00109-2)
35. Donmez G., Aksu Z. (1999). The effect of copper (II) ions on the growth and bioaccumulation properties of some yeasts. *Process Biochemistry*, 35, 135 - 142. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00044-8](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00044-8)
36. Volesky B., May H., Holan Z.R. (1993). Cadmium biosorption by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnol. Bioengineering*, 41, 826 - 829. <https://doi.org/10.1002/bit.260410809>
37. Padmavathy V., Vasudevan P., Dhingra S.C. (2003). Biosorption of nickel(II) ions on baker's yeast. *Process Biochemistry*, 38, 1389 - 1395. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00168-1](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00168-1)
38. Солопов М.В., Легенький Ю.А., Беспалова С.В., Холявка М.Г. (2019). Биосорбция ионов тяжелых металлов дрожжевыми клетками, модифицированными наночастицами магнетита. *Вестник ВГУ. Серия: Химия, биология, фармацевтика*, 1, 96 - 102.
39. Аронбаев С.Д., Насимов А.М., Парпиев Н.А., Аронбаев Д.М. (2011). Биосорбционное концентрирование тяжелых металлов клеточными оболочками пивоваренных дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Доклады академии наук Республики Узбекистан, 3, 58 - 60.
40. Насимов А.М., Аронбаев С.Д. (2011). Биосорбция ионов свинца, кадмия и меди осадочными дрожжами *Saccharomyces cerevisiae*. *Экологические системы и приборы*, 2, 3-7.
41. Аронбаев С.Д. (2016). Изучение сорбции ионов тяжелых металлов биосорбентом на основе клеточных стенок дрожжей, иммобилизованных в Са-альгинатный гель в статическом и динамическом режимах. *Universum: Химия и биология*, 6(24). <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/3255>
42. Пат. 2509734 РФ, 2014.
43. Гаранин Р.А. Дисс. ... канд. биол. наук. Москва, 2011.
44. Горобец С.В., Горобец О.Ю., Гойко И.Ю., Касаткина Т.П., Орлов Д. (2002). Ускорение биосорбции ионов меди из раствора в магнитном поле дрожжами *Saccharomyces cerevisiae*. М.: Высшая Школа.

45. Ермолаева Г.А. (2003). Получение пива с применением иммобилизованных дрожжей. *Пиво и напитки*, 4, 8 - 11.
46. Николенко Ю.М., Холомейдик А.Н., Земнухова Л.А., Устинов А.Ю., Полякова Н.В. (2012). Сорбция ионов марганца из водных растворов образцами диоксида кремния, полученными из рисовой шелухи. *Вестник ДВО РАН*, 5, 70 - 73.
47. Lu Y.M., Wilkins E. (1996). Heavy metal removal by caustic-treated yeast immobilized in alginate. *J. Hazard. Mater.*, 49(2-3), 165 - 179. [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(96\)01754-2](https://doi.org/10.1016/0304-3894(96)01754-2)
48. Карпенко Д.В. Разработка технологии получения биосорбентов на основе осадочных пивных дрожжей и их применения для производства пива, этилового спирта и других пищевых продуктов. Дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2005.
49. Сагоян С.К. Дисс. ... канд. техн. наук. Ялта, 1998.

## References:

1. Leoni, L., & Sartori, F. (1996). Heavy metals and arsenic in sediments from the continental shelf of the Northern Tyrrhenian. Eastern Ligurian Seas. *Marine environmental research*, 41(1), 73 - 98. [https://doi.org/10.1016/0141-1136\(94\)00153-7](https://doi.org/10.1016/0141-1136(94)00153-7)
2. Mendil, D., & Uluözlu, Ö.D. (2007). Determination of trace metal levels in sediment and five fish species from lakes in Tokat, Turkey. *Food Chemistry*, 101(2), 739 - 745. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.01.050>
3. Demirak, A., Yilmaz, F., Levent Tuna, A., & Ozdemir, N. (2006). Heavy metals in water, sediment and tissues of *Leuciscus cephalus* from a stream in southwestern Turkey. *Chemosphere*, 63(9), 1451 - 1458. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.09.033>
4. Fernandes, C., Fontainhas-Fernandes, A., Peixoto, F., & Salgado, M.A. (2007). Bioaccumulation of heavy metals in *Liza saliens* from the Esmoriz – Paramos coastal lagoon, Portugal. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 66(3), 426 - 431. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2006.02.007>
5. Vardhan, K.H., Kumar, P.S., & Panda, R.C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 290, 111197. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197>
6. Loska, K., & Wiechuła, D. (2004). Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, 51(8), 723 - 733. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00187-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00187-5)
7. Sankhla, M.S., Kumari, M., Nandan, M. Kumar, R., & Agrawal, P. (2016). Heavy metals contamination in water and their hazardous effect on human health - a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Science*, 5(10), 759 - 766. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3428216>
8. Biney, C., Amuzu, F., Calamari, D., Kaba, N., & Mbome, I. (1994). Review of heavy metals in the African aquatic environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 28(2), 134 - 159. <https://doi.org/10.1006/eesa.1994.1041>
9. Alloway, B.J. (2004). *Heavy metals in soils*. Netherlands: Springer.
10. Tchounwou, P.B., Centeno, J.A., & Patlolla, A.K. (2013). Arsenic toxicity, mutagenesis and carcinogenesis – a health risk assessment and management approach. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 255(1-2), 47 - 55. <https://doi.org/10.1023/B:MCBI.0000007260.32981.b9>
11. Yedjou, C.G. (2008). Oxidative stress in human leukemia cells (HL-60), human liver carcinoma cells (HepG2) and human Jerkat-T cells exposed to arsenic trioxide. *Metal Ions in Biology and Medicine*, 9, 298 - 303.
12. Yershov, Yu.A., & Pletneva, T.V. (1989). *Mechanisms of toxic action of inorganic compounds*. М.: Medicine (in Russ.).
13. Skugoreva, S.G., Ashikhmina, T.Ya., Fokina, A.I., & Lyalina, E.I. (2016). Chemical grounds of toxic effect of heavy metals (review). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*, 1, 4-13 (in Russ.).

14. Tchounwou, P.B., Ishaque, A.B., & Schneider, J. (2012). Cytotoxicity and transcriptional activation of stress genes in human liver carcinoma cells (HepG<sub>2</sub>) exposed to cadmium chloride. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 222(1-2), 21 - 28.  
<https://doi.org/10.1023/A:1017922114201>
15. Patlolla, A., Barnes, C., Yedjou, C., & Velma, V. (2009). Oxidative stress, DNA damage and antioxidant enzyme activity induced by hexavalent chromium in Sprague Dawley rats. *Environmental toxicology*, 24(1), 66 - 73. <https://doi.org/10.1002/tox.20395>
16. Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Foxx, D., Ishaque, A., & Shen, E. (2001). Lead-induced cytotoxicity and transcriptional activation of stress genes in human live carcinoma cells (HepG<sub>2</sub>). *Molecular and cellular biochemistry*, 255(1-2), 161 - 170.  
<https://doi.org/10.1023/A:1017922114201>
17. Sutton, D.J. (2012). Mercury induces the externalization of phosphatidylserine in human proximal tubule (HK-2) cells. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 4(2), 138 - 144. <https://doi.org/10.3390/ijerph2007040008>
18. Hamer, D.H. (1986). Metallothioneins. *Annual Review of Biochemistry*, 55, 913 - 951.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.bi.55.070186.004405>
19. Norheim, G. (1987). Levels and interactions of heavy metals in seabirds from Svalbard and the Antarctic. *Environmental Pollution*, 47, 83 - 94. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(87\)90039-X](https://doi.org/10.1016/0269-7491(87)90039-X)
20. Davis, J.M., & Russel, R. (1988). The influence of dissolved selenium compounds on the accumulation of inorganic and methylated mercury compounds from solution by the mussel *Mytilus edulis* and the plaice *Pleuronectes platessa*. *Science of the Total Environment*, 68, 197 - 205. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(88\)90372-5](https://doi.org/10.1016/0048-9697(88)90372-5)
21. Coronelli, T.V. (1996). Principles and methods for raising the efficiency of biological degradation of carbohydrates in the environment. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 32(6), 579 - 585.
22. Kalyuzhnyi, C.V. (2004). High-intensity anaerobic biotechnologies for industrial wastewater treatment. *Kataliz v promyshlennosti = Catalysis in Industry*, 6, 42-50 (in Russ).
23. Weijma, J., Copini, C.F.M., Buisman, C.J.N., & Schultz, C.E. (2002). *Biological recovery of metals, sulfur and water in the mining and metallurgical industry*. In: *Water recycling and resource recovery in industry : analysis, technologies and implementation*. IWA: London.
24. Uslu, G., & Tanyol, M. (2006). Equilibrium and thermodynamic parameters of single and binary mixture biosorption of lead and copper ions onto *Pseudomonas putida*. Effect of temperature. *Journal of Hazardous Materials*, 135, 87 - 93.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.029>
25. Gadd, G.M. (1990). Heavy metal accumulation by bacteria and other microorganisms. *Experientia*, 46, 834 - 840.
26. He, J., & Chen, J.P. (2014). A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: Materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. *Bioresource Technology*, 160, 67 - 78. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.068>
27. Tunali, A.A. (2006). Removal of lead and copper ions from aqueous solutions by bacterial strain isolated from soil. *Chemical Engineering Journal*, 115, 203 - 211.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2005.09.023>
28. Naz, T., Khan, M., Ahmed, I., Rehman, S., Rha, E., Malook, I., & Jamil, M. (2016). Biosorption of heavy metals by *Pseudomonas* species isolated from sugar industry. *Toxicology and Industrial Health*, 32, 1619 - 1627. <https://doi.org/10.1177/0748233715569900>
29. Dursun, A.Y., Uslu, G., Cuci, Y., & Aksu, Z. (2003). Bioaccumulation of copper(II), lead(II) and chromium(VI) by growing *Aspergillus niger*. *Process Biochemistry*, 38, 1647 - 1651.  
[https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00075-4)
30. Cabuk, A., Ilhan, S., Filik, C., & Caliskan, F. (2005). Pb<sup>2+</sup> biosorption by pretreated fungal biomass. *Turkish Journal of Biology*, 29, 23 - 28.
31. Say, R., Yimaz, N., & Denizli, A. (2003). Removal of heavy metal ions using the fungus *Penicillium canescens*. *Adsorption Science Technology*, 21, 643 - 650.

32. Tan, T.W, Hu, B., & Su, H.J. (2004). Adsorption of Ni<sup>2+</sup> on amine-modified mycelium of *Penicillium chrysogenum*. *Enzyme Microbiology and Technology*, 35, 508 - 513. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2004.08.035>
33. Day, R., Denizli, A., & Arica, M.Y. (2001). Biosorption of cadmium(II), lead(II) and copper(II) with the filamentous fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Bioresource Technology*, 76, 67 - 70. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00071-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00071-7)
34. Ozer, A., & Ozer, D. (2003). Comparative study of the biosorption of Pb(II), Ni(II) and Cr(VI) ions onto *S. cerevisiae*: determination of biosorption heats. *Journal of Hazardous Materials*, 100, 219 - 229. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00109-2)
35. Donmez, G., & Aksu, Z. (1999). The effect of copper (II) ions on the growth and bioaccumulation properties of some yeasts. *Process Biochemistry*, 35, 135 - 142. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00044-8](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00044-8)
36. Volesky, B., May, H., & Holan, Z.R. (1993). Cadmium biosorption by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnol. Bioengineering*, 41, 826 - 829. <https://doi.org/10.1002/bit.260410809>
37. Padmavathy, V., Vasudevan, P., & Dhingra, S.C. (2003). Biosorption of nickel(II) ions on baker's yeast. *Process Biochemistry*, 38, 1389 - 1395. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00168-1](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00168-1)
38. Solopov, M.V., Legenky, Yu.A., Bepalova, S.V., & Kholyavka, M.G. (2019). Biosorption of heavy metal ions by yeast cells modified with magnetite nanoparticles. *Vestnik Voronezhskogo Gos. Universiteta = Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry, biology, pharmacy*, 1, 96 - 102 (in Russ.).
39. Aronbaev, S.D., Nasimov, A.M., Parpiev, N.A., & Aronbaev, D.M. (2011). Biosorption concentration of heavy metals by cell membranes of brewer's yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Doklady Akademii Nauk Resp. Uzbekistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan*, 3, 58 - 60 (in Russ.).
40. Nasimov, A.M., & Aronbaev, S.D. (2011). Biosorption of lead, cadmium and copper ions by sedimentary *Saccharomyces cerevisiae* yeasts. *Ekologicheskiye systemy i pribory = Ecological systems and devices*, 2, 3 - 7 (in Russ.).
41. Aronbaev, S.D. (2016). Study of heavy-metal ions sorption of by biosorbent based on yeast cell walls immobilized in a CA-alginate gel in static and dynamic modes. *Universum: Chemistry and biology*, 6(24). <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/3255>
42. Pat. 2509734, Russian Federation, 2014.
43. Garanin, R.A. (2011). *Biosorption method of heavy metals from industrial waste water using brewed yeast Saccharomyces cerevisiae* (Ph.D. dissertation). Moscow: Institute for Biomedical Problems (in Russ.).
44. Gorobets, S.V., Gorobets, O.Yu., Goiko, I.Yu., Kasatkina, T.P., & Orlov, D. (2002). *Acceleration of biosorption of copper ions from solution in magnetic field by yeast Saccharomyces cerevisiae*. M.: Vysshaya shkola (in Russ.).
45. Ermolaeva, G.A. (2003). Preparation of beer using immobilized yeast. *Pivo i napitki = Beer and Beverages*, 4, 8 - 11 (in Russ.).
46. Nikolenko, Yu.M., Holomeidik, A.N., Zemnukhova, L.A., Ustinov, A.Yu., & Polyakova, N.V. (2012). Sorption of manganese ions with silica samples prepared from rice hull from aqueous solutions. *Vestnik Dalnevostochnogo Otdeleniya Rossiiskoi Akademii Nauk = Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 5, 70 - 73 (in Russ.).
47. Lu, Y.M., & Wilkins, E. (1996). Heavy metal removal by caustic-treated yeast immobilized in alginate. *J. Hazard. Mater.*, 49(2-3), 165 - 179. [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(96\)01754-2](https://doi.org/10.1016/0304-3894(96)01754-2)
48. Karpenko, D.V. (2005). *Development of technology for producing biosorbents based on sedimentary brewer's yeast and their application for production of beer, ethyl alcohol and other food products* (Doctoral dissertation). M.: Moscow State University of Food Production (in Russ.).

49. Sagoyan, S.K. (1998). *Biochemical features of using immobilized yeast in production of sparkling wines by bottle method* (Ph.D. dissertation). Yalta: Ukrainian Academy of Agrarian Sciences (in Russ.).