

УДК 579.695  
AGRIS P01

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/131/08>

## ОЧИСТКА ТОЛИЩИ ВОДЫ ВОДОЕМОВ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОТЕХНОЛОГИЙ НА ТЕРРИТОРИИ АПШЕРОНСКОГО ПОЛУОСТРОВА

- ©**Гасимова А. С.**, ORCID:0000-0002-3339-0733, SPIN-код: 9934-9398, канд. биол. наук, Институт молекулярной биологии, г. Баку, Азербайджан, [gasimovaa77@gmail.com](mailto:gasimovaa77@gmail.com)  
©**Наджафова С. И.**, ORCID: 0000-0002-8190-4006, SPIN-код: 9930-5447, д-р биол. наук, Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджан, [nadjafovas@yahoo.com](mailto:nadjafovas@yahoo.com)  
©**Исмаилов Н. М.**, ORCID: 0000-0003-3438-7648, д-р биол. наук, Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджан, [ismaylovn@mail.ru](mailto:ismaylovn@mail.ru)  
©**Байрам К. Х.**, ORCID:0009-0000-4021-4597, канд. биол. наук, Институт молекулярной биологии, г. Баку, Азербайджан, [konulbayram74@gmail.com](mailto:konulbayram74@gmail.com)

### Purification of water bodies from heavy metals using biotechnology in the Absheron Peninsula

- ©**Gasimova A.**, ORCID: 0000-0002-3339-0733, SPIN-code: 9934-9398, Ph.D., Institute of Molecular Biology, Baku, Azerbaijan, [gasimovaa77@gmail.com](mailto:gasimovaa77@gmail.com)  
©**Nadjafova S.**, ORCID: 0000-0002-8190-4006, SPIN code: 9930-5447, Dr. habil., Baku State University, Baku, Azerbaijan, [nadjafovas@yahoo.com](mailto:nadjafovas@yahoo.com)  
©**Ismaylov N.**, ORCID: 0000-0003-3438-7648, Dr. habil., Baku State University, Baku, Azerbaijan, [ismaylovn@mail.ru](mailto:ismaylovn@mail.ru)  
©**Bayram K.**, ORCID:0009-0000-4021-4597 Ph.D., Institute of Molecular Biology, Baku, Azerbaijan, [konulbayram74@gmail.com](mailto:konulbayram74@gmail.com)

**Аннотация.** Одной из острых экологических проблем аридных регионов Азербайджана является наличие озер-водоемов, большинство из которых имеет техногенное происхождение. На территории Апшеронского промышленного региона насчитывается свыше 200 водных бассейнов, загрязненных тяжелыми металлами (ТМ) — свинцом, медью и цинком, — где степень загрязнения значительно превышает ПДК. Проведены исследования с целью поиска подходов и принципов биотехнологий очистки водоемов Апшеронского промышленного региона от ТМ. На примере меди показана способность микробиоценоза избыточного активного ила (ИАИ) и ассоциации пробиотиков «Ферми-старт» к их аккумуляции. Очистка воды от ТМ при использовании сухих микробных клеток как пробиотиков «Ферми-старт», так и ИАИ оказалась в среднем на 6–7% эффективнее по сравнению с живыми клетками. Степень очистки от меди в течение 1 часа в среде, содержащей микробиоту ИАИ, составляла в среднем 69–96%, а в среде с пробиотиками «Ферми-старт» — 84–96%. ИАИ и ассоциация микроорганизмов «Ферми-старт» характеризуются высоким потенциалом адсорбции ТМ; как единая биосистема они могут быть эффективны при разработке биотехнологий очистки водоемов от загрязняющих веществ. Использование ИАИ для решения актуальной экологической проблемы аридного региона — биоочистки загрязненных тяжелыми металлами водоемов — позволит формировать замкнутые биотехнологические хозяйства и эффективно использовать региональные вторичные биоресурсы на основе «биокластерного» подхода.

**Abstract.** One of the pressing environmental problems in Azerbaijan's arid regions is the management of lakes and reservoirs, most of which are man-made. The Absheron industrial region contains over 200 water bodies contaminated with heavy metals — lead, copper, and zinc — at levels

significantly exceeding the maximum permissible concentration. Research was conducted to identify approaches and principles for the biotechnological treatment of water bodies in the Absheron industrial region contaminated with heavy metals. The ability of the microbiota of excess activated sludge (EAS) and the association of Fermi-Start probiotics, produced in Azerbaijan, to accumulate heavy metals was demonstrated using copper as an example. Water purification from heavy metals using dried microbial cells of both Fermi-Start and EAS probiotics was, on average, 6–7% more effective than using live cells. Copper removal within one hour in a medium containing EAS microbiota averaged 69–79%, while in a medium containing Fermi-Start probiotics, it was 80–94%. The EAS and Fermi-Start microbial associations are characterized by a high potential for heavy metal adsorption, and as a unified biosystem, they can be effective for developing biotechnologies to purify water bodies of polluting heavy metals. Using EAS to address a pressing environmental problem in the arid region—the bioremediation of water bodies contaminated with heavy metals—will enable the development of closed-loop biotechnological farms and the efficient use of regional secondary bioresources using a "biocluster" approach.

*Ключевые слова:* Азербайджан; водоемы; тяжелые металлы; загрязнение; микроорганизмы; биоочистка; биокластерный подход.

*Keywords:* Azerbaijan; water bodies; heavy metals; pollution; microorganisms; bioremediation; biocluster approach.

Являясь одними из самых опасных загрязнителей окружающей среды, тяжелые металлы (ТМ) как загрязнители ландшафтов привлекают особо пристальное внимание. Они составляют значительную часть среди загрязнителей экосистем и по своему токсическому воздействию уступают только пестицидам. Почвенный покров и водные экосистемы загрязняются ртутью, кадмием, свинцом, мышьяком и др., обладающими биоцидными свойствами. Включившись в биогеохимический цикл, ТМ очень редко и медленно покидают его. В этой связи проблема предотвращения попадания этих веществ в компоненты экосистем, а также охрана и очистка окружающей среды от загрязнения являются важнейшими научными задачами [2, 19, 21].

Наибольшей опасности подвергаются пресноводные экосистемы, в которых ТМ техногенного происхождения активно аккумулируются. ТМ поступают в водные среды с поверхностным стоком, атмосферными осадками и в составе загрязненных сточных вод [23].

Принимая во внимание особенности поведения этих веществ в гидроэкосистемах и специфику метаболизма в живых организмах, последствия их влияния на биологические системы часто непредсказуемы. В процессах миграции и биологической трансформации ТМ в различных природных средах важная роль принадлежит микроорганизмам [17].

Ряд тяжёлых металлов, например Zn, Cu, Co, Ni и др., в малых количествах в качестве микроэлементов необходимы для жизнедеятельности микроорганизмов. Однако при повышенных концентрациях они могут быть токсичными для микроорганизмов [3, 5, 9].

А такие ТМ, как свинец, кадмий, ртуть и медь, относятся к «критической группе веществ-индикаторов стресса окружающей среды». Микробиоценозы, составляющие основу современных пробиотиков, представляют значительный интерес в связи с тем, что они относятся к организмам, наиболее интенсивно аккумулирующим тяжёлые металлы [8, 11, 22].

В этой связи появились идеи применения различных групп микроорганизмов для удаления металлов из растворов, что представляется технологичным для очистки вод, загрязненных ТМ, а также перспективным для извлечения таких металлов, как серебро, золото и многие другие. Хорошо известная способность микроорганизмов извлекать металлы из

водных растворов и накапливать их делает потенциально перспективным использование такого процесса концентрирования. Например, было показано, что для пурпурных несерных бактерий *Rhodospseudomonas* spp. и *Rhodobacter* spp. свойственно накапливать Zn, Cu, Ni, Hg, при этом они характеризуются разной устойчивостью к этим металлам [10].

Показана способность пекарских дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* очищать загрязненную воду от мышьяка, при этом установлено, что степень очистки воды от мышьяка достигала 90,45% [14].

В настоящее время имеется достаточно сведений об устойчивости к ТМ различных углеводородокисляющих микроорганизмов. Выявлена устойчивость алканотрофных бактерий *Rhodococcus erythropolis*, *R. fascians*, *R. rhodochrous* и *R. ruber* к  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Mo^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  и  $Cr^{2+}$  в концентрации более 100 мМ, показана способность *Acinetobacter* sp. расти в среде, загрязненной ПАУ и тяжелыми металлами, а также биоаккумуляция тяжелых металлов бактериями рода *Bacillus* [7, 16, 20].

Наличие озер-водоемов, большинство из которых техногенного происхождения, – одна из острых экологических проблем аридных регионов Азербайджана. На территории Апшеронского п-ва свыше 200 водных бассейнов, 30 из которых являются сравнительно крупными, и около 130 – мелких. Загрязнение ТМ, например, свинцом в зоне прибрежных вод озера Беюк-Шор выше фонового уровня в 300 раз, медью – в 200, цинком – в 170 раз [4, 13, 15, 18].

Достаточно отметить, что только в озеро Беюк-Шор из 33 промышленных и коммунальных объектов ежегодно сбрасывается 9–12 млн м<sup>3</sup> загрязненных вод [1].

Цель исследования заключается в разработке метода биоочистки озер этого региона от ТМ с использованием способности различных групп микроорганизмов к адсорбции этих химических элементов.

#### Материал и методы исследования

Для исследования были использованы пробы воды, взятые из озера Беюк-Шор, расположенного на Апшеронском полуострове. Содержание меди в пробе воды превышало верхний предел нормы. Количество меди в воде определяли с помощью прибора Palintest Photometer. Этот металл наряду с другими элементами – кадмием, свинцом, ртутью – является одним из загрязнителей водных экосистем; его содержание в природных водах может достигать 0,3–46 мкг/л [4, 6].

О способности к биоаккумуляции  $Cu^{2+}$  микроорганизмами судили по степени исчезновения ионов меди из культуральной жидкости. В лабораторных исследованиях по сорбции Cu микробными клетками нами использовались: активный микробиоценоз избыточного активного ила (ИАИ) и препарат «Ферми-старт»; сухая биомасса ИАИ и препарата «Ферми-старт». Биопрепарат «Ферми-старт» производится в Азербайджане на промышленном уровне (компания «АгроБиоТех»). Препарат относится к группе эффективных микроорганизмов, в его состав входят фотосинтезирующие, молочнокислые, азотфиксирующие бактерии, а также консорциум микроорганизмов из группы дрожжевых грибов и актиномицетов. Минимальное содержание микроорганизмов —  $1 \cdot 10^8$  КОЕ. ИАИ отбирали с аэрационной станции Гоусаны, где очищаются сточные воды г. Баку. В качестве наполнителя-адсорбента использовали древесные опилки (размером 0,15–0,35 мм) (Рисунок 1).

Биомассу микроорганизмов высушивали в стеклянных ампулах под вакуумом на водяной бане с контролируемой температурой. Остаточная влажность составляла 11–13%. После высушивания при 105 °С получали сухую биомассу, которую использовали в экспериментах.

Для получения сухой биомассы использовали разные объемы суспензии растущих клеток (1 мл, 5 мл, 10 мл).

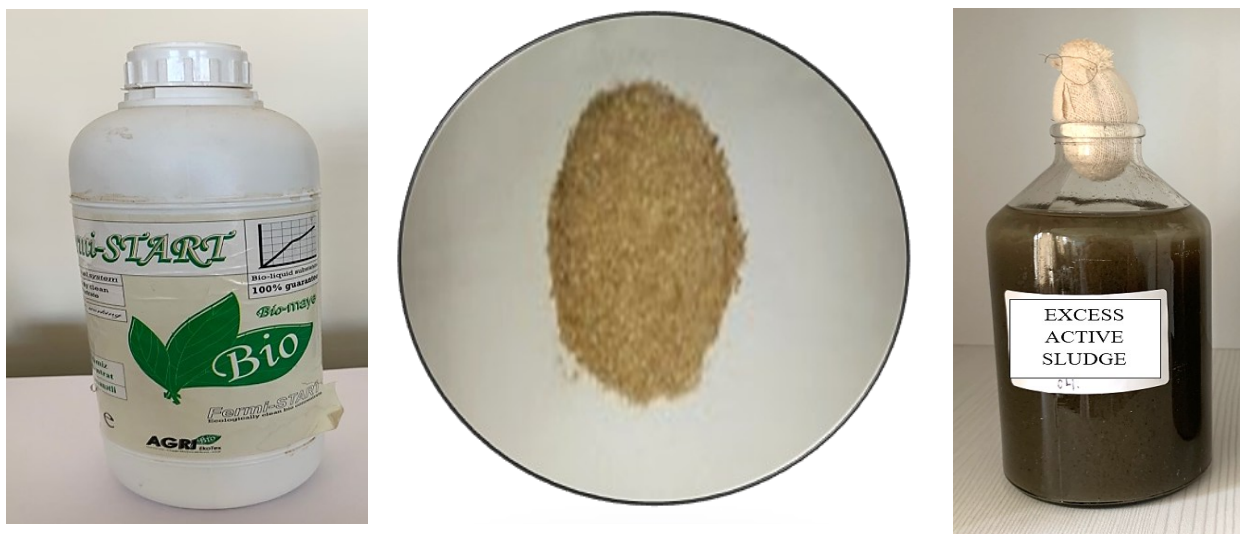


Рисунок 1. Биопрепарат «Ферми-старт», ИАИ и древесные опилки

Период наступления фазы стационарного роста при выращивании бактерий в отсутствие соли меди и в её присутствии исследовали по оптической плотности суспензии с использованием фотоэлектроколориметра ФЭК-2. Влияние меди на рост и развитие микроорганизмов изучали при концентрации соли 0,15–2,1 мг/л. Адсорбцию меди изучали в колбах Эрленмейера объемом 250 мл в динамических условиях (Рисунок 2).



Рисунок 2. Процесс адсорбции меди в динамических условиях

В колбы, содержащие по 30 мл водного раствора металла, вносили навески биомассы ИАИ и пробиотических микроорганизмов в разных количествах (100, 500, 750 мг по сухому весу), затем колбы помещали в термостат на качалку (130 об/мин, 25°C). В качестве контроля использовали колбы с раствором меди, в которые биомасса микроорганизмов не вносилась. Через 20–60 мин культивирования микробную массу отделяли от жидкой среды путем фильтрации через мембранный фильтр, после чего в фильтрате анализировали остаточную концентрацию металлов. Исходная концентрация Cu составляла 4,80 мг/л.

Концентрацию адсорбированных ионов меди рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{(C_{исх.} - C_{равн.}) \cdot V}{m}$$

где  $A$  — ёмкость адсорбции, мг/г сорбента;  $C_{исх.}$  и  $C_{равн.}$  — соответственно исходная и равновесная концентрация раствора (в пересчете на концентрацию металла), мг/л;  $V$  — объем раствора, л;  $m$  — масса адсорбента ( в пересчете на сухое вещество), г.

Остаточное содержание  $Cu$  определяли в динамике времени методом фотометрии при длине волны 520 нм. Для вычисления степени очистки водного раствора от ионов меди была использована следующая формула:

$$J = \frac{(C_{исх.} - C_{равн.}) \cdot 100\%}{C_{исх.}}$$

где  $J$  — степень очистки водных растворов от ионов  $Cu$ , %;  $C_{исх.}$  и  $C_{равн.}$  — соответственно исходное и равновесные концентрации раствора (в пересчете на металл), в мг/л.

Время наступления стационарной фазы при выращивании микроорганизмов без добавления солей  $Cu$  определяли на фотоэлектроколориметре (ФЭК). Для ИАИ оно составило 27 ч, для пробиотиков — 29 ч. Наступление стационарной фазы в среде наблюдали через 29–32 ч выращивания. В целом, при наличии в среде  $Cu$  наступление стационарной фазы тормозится у микробиоценоза ИАИ и пробиотиков «Ферми-старт». Все исследования проведены в трех повторностях.

### Результаты и обсуждение

Результаты определения физических и химических параметров озера Беюк-Шор приведены в Таблице 1. В ходе лабораторных исследований была проверена адсорбционная способность пробиотических микроорганизмов для обеспечения сорбции тяжелых металлов из водной среды. В качестве ассоциации пробиотических микроорганизмов использовался препарат «Ферми-старт». Результаты, представленные в Таблице 2, показывают, что ассоциация пробиотических микроорганизмов при внесении в воду с исходным содержанием меди 5,0 мг/л (более 5 ПДК) снижает содержание металла в воде на 78%, т. е. практически до уровня ПДК.

Таблица 1

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЗЕРА БЕЮК-ШОР

| Показатели                           | ПДК          | Озеро Беюк-Шор |
|--------------------------------------|--------------|----------------|
| pH                                   | 6,5-8,5      | 9,2            |
| Растворенный кислород, (мг $O_2$ /л) | $\leq 4$     | 6-7            |
| Нитрит $NO_2$ , (мг $O_2$ /л)        | 3,3          | 0,19           |
| Нитрат $NO_3$ , (мг $O_2$ /л)        | 45           | 0,66           |
| Хлориды, мг/л                        | 350          | 1834           |
| $Cu$ , мг/л                          | 0,0003-0,046 | 1,72-5         |
| Температура, $^{\circ}C$             |              | 12-17          |

На основании данных был проведен модельный эксперимент по изучению эффективности комбинированного использования адсорбентов с микроорганизмами для удаления тяжелых металлов из водной среды. Для проведения экспериментов образцы воды

озера Беюк-Шор, в которых содержание меди составляло 4,56 мг/л, пропускали через биофильтры (стеклянные колонки длиной 25 см) в двух вариантах (активный микробиоценоз избыточного активного ила (ИАИ) и препарат «Ферми-старт», а также сухая биомасса ИАИ и препарат «Ферми-старт»), заполненные по схеме: 1. высушенная биомасса пробиотиков «Ферми-старт» / препарат «Ферми-старт»; 2. высушенная биомасса «Ферми-старт» + опилки / препарат «Ферми-старт» + опилки; 3. высушенная биомасса активного ила / биомасса активного ила; 4. высушенная биомасса ИАИ + опилки / биомасса ИАИ + опилки.

Таблица 2

ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ МЕДИ С ПОМОЩЬЮ БИОАДСОРБЕНТА НА ОСНОВЕ  
ПРОБИОТИЧЕСКИХ МИКРООРГАНИЗМОВ «ФЕРМИ-СТАРТ»

| Элемент | ПДК в питьевой<br>воде, мг/л | Концентрация меди, мг/л |                | Степень<br>очистки, % |
|---------|------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|
|         |                              | Исходная                | Через 40 минут |                       |
| Cu      | 1,0                          | 5,0                     | 1,1            | 78                    |

Воду через колонки пропускали 3 раза. После каждого пропускания определяли остаточное содержание меди. Данные, приведенные на Рисунке 3, показывают, что основная часть меди адсорбировалась микробной биомассой после первого пропускания (57%), после 2 фильтрования — еще 14%, после 3 — 9%.

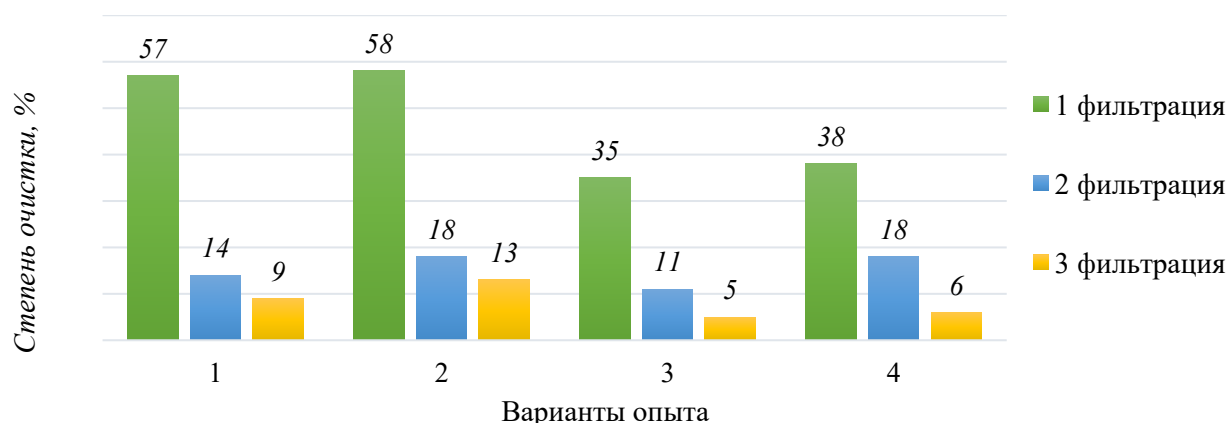


Рисунок 3. Степень очистки воды Беюк-Шор от меди при пропускании через биофильтры. 1 - Высушенная биомасса «Ферми-старт», 2 - Высушенная биомасса «Ферми-старт» + опилки, 3 - Высушенная биомасса активного ила, 4 - Высушенная биомасса активного ила + опилки

Во втором варианте эксперимента обнаруживали аналогичную закономерность: основное количество меди адсорбировалось при первой фильтрации. В обоих вариантах результаты были схожи. Таким образом, в результате трехкратной фильтрации через колонку с биомассой высушенных микроорганизмов достигалась 80–89%-ная очистка воды от меди. Аналогичным образом проводили исследования с ИАИ. Данные, приведенные на Рисунке 4, показывают, что адсорбирующая способность ИАИ была значительно ниже по сравнению с микроорганизмами-пробиотиками. При этом суммарная степень очистки от меди при трехкратном пропускании через биофильтры, состоящие из сухой биомассы препарата «Ферми-старт» (в чистом виде и с добавлением опилок), составляла 80–89%. Трехкратное же пропускание через биофильтры, состоящие из сухого активного ила (в чистом виде и с добавлением опилок), способствовало адсорбции меди на биофильтре в среднем на 51–62%. Во всех вариантах использование древесных опилок в качестве дополнительного адсорбирующего материала повышало степень очистки загрязненной воды от меди.

Результаты исследований, представленных на Рисунке 4, показывают, что во всех вариантах концентрация Си снижалась в среднем на 69–94%. Вместе с тем системный анализ показал, что в среде с пробиотиками «Ферми-старт» по сравнению с микробиоценозом ИАИ снижение содержания Си в воде было значительно выше. Причина этого, вероятно, кроется в том, что используемый в наших лабораторных экспериментах ИАИ уже был насыщен ТМ, содержащимися в очищаемых на аэрационной станции сточных водах г. Баку, т. е. активная адсорбционная поверхность этого микробиоценоза уже снижена. Известно, что в сухом активном иле Гоусанинской аэрационной станции содержание меди составляло 4,5 мг/кг. В результате адаптации у бактерий появились специальные механизмы защиты от ТМ. Например, внеклеточный барьер является одним из распространенных и энергетически выгодных защитных механизмов и заключается в предотвращении попадания ионов металла в клетку [12].

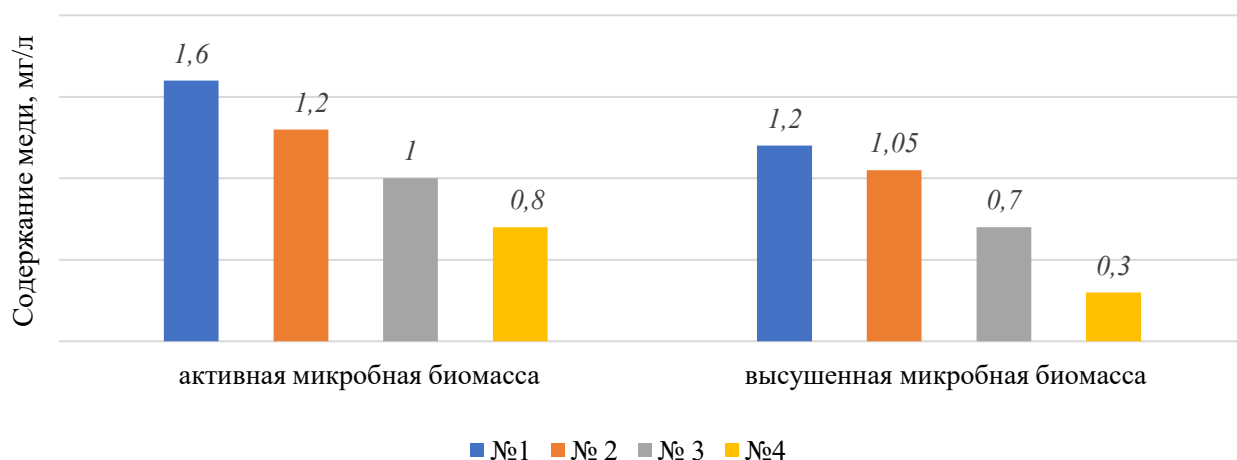


Рисунок 4. Степень очистки воды от Си при использовании биоадсорбентов. 1 - биомасса «Ферми-старт», 2 - биомасса «Ферми-старт» +опилки, 3 - биомасса активного ила, 4 - биомасса активного ила+опилки

Вместе с тем данные показывают, что очистка воды от ТМ при использовании сухих микробных клеток как пробиотиков «Ферми-старт», так и ИАИ была в среднем на 6–7% эффективнее по сравнению с живыми клетками. Продолжительность эксперимента составляла 1 час.



Рисунок 5. Схема адсорбции нано-частиц меди на клеточной стенке бактерий

Очистка загрязненной воды озера Беюк-Шор от меди рассмотрена нами с точки зрения имеющихся воззрений на способность адсорбции металлов на клеточной поверхности.

Бактериальная клетка, в зависимости от своего размера, обладает поверхностью, потенциально характеризующейся высокой емкостью для поглощения металлов. Принимая во внимание правило для смесей, состоящих из частиц разного размера — «большая пожирает мелкую», — частицы металлов будут поглощаться и адсорбироваться на поверхности более крупной живой частицы — бактериальной клетки (Рисунок 5).

Одна бактериальная клетка, в зависимости от своего размера и емкости поглощения, способна потенциально адсорбировать как на поверхности клеточной стенки, так и на поверхности жгутиков и фибрилл десятки тысяч наночастиц металлов. При этом можно рассчитать как удельную поверхность бактерий и объем (количество) наночастиц металлов, которые потенциально могут быть адсорбированы, так и ожидаемый технологический эффект. Так, если длина бактериальной клетки составляет в среднем 3–5 мкм, то только на поверхности её клеточной стенки могут адсорбироваться от 23 000 до 39 000 наночастиц меди (размером 0,000128 мкм). Не меньшее количество наночастиц металлов может быть адсорбировано на поверхности жгутиков и фибрилл бактерий. Бактерии, адсорбирующие наночастицы металлов, будут представлять собой нанобактериальные капсулы, которые в условиях загрязненной водной среды будут работать на наноуровне. Таким образом, для ИАИ и ассоциации микроорганизмов-пробиотиков «Ферми-старт» характерен высокий потенциал адсорбции ТМ, и они как единая биосистема могут быть эффективными при разработке биотехнологий очистки водоемов от загрязняющих их ТМ.

Практическое использование метода очистки вод от тяжелых металлов может осуществляться путем многократного пропускания воды водоема с помощью насосов через систему биофильтров — своеобразных биобонов, расположенных вдоль побережья. Их число, мощность и пропускная способность определяются в каждом конкретном случае в зависимости от объема воды, степени загрязненности и других факторов. Биофильтры заполняются активным илом или ассоциацией микроорганизмов-пробиотиков «Ферми-старт», адгезированных на природных адсорбентах. Поскольку они, как правило, являются органической частью существующих экосистем, адсорбенты на их основе в наибольшей степени соответствуют экологическим требованиям. Можно использовать древесную щепу, опилки, модифицированный торф, высушенные зернопродукты, шерсть, хлопковый линт, сапропель, гуминовые кислоты (например, гумигель) или макулатуру. Таким образом, адсорбенты совместно с активным илом будут функционировать как единая биосистема, эффективно извлекающая тяжелые металлы из водной среды. После достижения в воде водоема концентрации тяжелых металлов, соответствующей показателям ПДК, очистку можно считать завершенной.

### *Выводы*

Эффективность очистки воды от меди при использовании сухих микробных клеток как препарата «Ферми-старт», так и ИАИ была в среднем на 6–7% выше по сравнению с живыми клетками. Хотя ИАИ и ассоциации микроорганизмов «Ферми-старт» и характеризуются высоким потенциалом адсорбции ТМ, все же степень очистки от меди различалась: так, в течение 1 часа в среде, содержащей микробиоту ИАИ, степень очистки составляла в среднем 69–94%, а в среде с пробиотиками «Ферми-старт» — 84–96%. Однако они как единая биосистема могут быть эффективными при разработке биотехнологий очистки водоемов от загрязняющих их ТМ.

Использование ИАИ в качестве биосистемы в биотехнологии очистки водных систем Апшеронского промышленного региона представляет особый интерес. Ежедневно при очистке свыше 600 тыс. м<sup>3</sup> бытовых сточных вод г. Баку на аэрационной станции Говсаны образуется свыше 40 т ИАИ. До настоящего времени активный ил не находит практического применения

в регионе. Использование его в технологиях очистки водных систем Апшеронского промышленного региона (их число в регионе составляет свыше 200 с общей площадью 2196 га) в первую очередь позволит решить проблему их эффективного использования для решения актуальной экологической проблемы аридного региона — создание замкнутого биотехнологического хозяйства и эффективное использование региональных вторичных биоресурсов.

Очищенные воды озер с учетом ограниченности водных ресурсов (за последние 12 лет количество осадков на территории страны снизилось на 38%) в условиях аридной зоны Апшеронского промышленного региона и перспектив дальнейшего роста среднегодовой температуры на 3–6 °С могут быть эффективно использованы для рекреационных проектов.

#### *Список литературы:*

1. Исмаилов Н. М., Наджафова С. И., Гасымова А. Апшеронский промышленный регион-факторы экологической напряженности // Аридные экосистемы. 2015. Т. 21. №3 (64). С. 92-100. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-083-089>
2. Наджафова С. И. Воздействие тяжелых металлов на обилие бактерий рода *Azotobacter* в серо-бурых почвах Апшеронского полуострова // Агрохимия. 2023. №4. С. 93-96. <https://doi.org/10.31857/S0002188123040099>
3. Abd Elnabi M. K., Elkaliny N. E., Elyazied M. M., Azab S. H., Elkhailifa S. A., Elmasry S., Mahmoud Y. A. G. Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: a review // Toxics. 2023. V. 11. №7. P. 580. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>
4. Aliyeva N. T., Sadigov R. A., Mamedova R. I., Ibadova S. Y. Analysis of the content of heavy metal ions in the coastal zones of the northern part of the Apsheron peninsula // Bulletin of the Karaganda University "Biology medicine geography Series". 2023. V. 109. №1. P. 176-183. <https://doi.org/10.31489/2023BMG1/175-183>
5. Alabssawy A. N., Hashem A. H. Bioremediation of hazardous heavy metals by marine microorganisms: a recent review // Archives of microbiology. 2024. V. 206. №3. P. 103. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03793-5>
6. Amin R. Determination of heavy metals of water, soil and rice grain in the adjacent areas of tannery and textile mills at savar and narayanganj. DSpace Repository. 2022.
7. Czarny J., Staninska-Pięta J., Piotrowska-Cyplik A., Juzwa W., Wolniewicz A., Marecik R. *Acinetobacter* sp. as the key player in diesel oil degrading community exposed to PAHs and heavy metals // Journal of hazardous materials. 2020. V. 383. P. 121168. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121168>
8. Dahiya U. R., Das J., Bano S. Biological indicators of soil health and biomonitoring // Advances in bioremediation and phytoremediation for sustainable soil management: Principles, monitoring and remediation. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 327-347. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89984-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89984-4_21)
9. Dave D., Sarma S., Parmar P., Shukla A., Goswami D., Shukla A., Saraf M. Microbes as a boon for the bane of heavy metals // Environmental Sustainability. 2020. V. 3. №3. P. 233-255. <https://doi.org/10.1007/s42398-020-00112-2>
10. Dhar K., Venkateswarlu K., Megharaj M. Anoxygenic phototrophic purple non-sulfur bacteria: tool for bioremediation of hazardous environmental pollutants // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2023. V. 39. №10. P. 283. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03729-7>

11. Diep P., Mahadevan R., Yakunin A. F. Heavy metal removal by bioaccumulation using genetically engineered microorganisms // *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. 2018. V. 6. P. 157. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00157>
12. Frei A., Verderosa A. D., Elliott A. G., Zuegg J., Blaskovich M. A. Metals to combat antimicrobial resistance // *Nature Reviews Chemistry*. 2023. V. 7. №3. P. 202-224. <https://doi.org/10.1038/s41570-023-00463-4>
13. Gasimova A. S. Development of Biotechnologies for Cleaning of Water Bodies on the Absheron Peninsula from Organic and Inorganic Pollutants // *Advanced Studies in Biology*. 2025. V. 17. №1. P. 75-82. <https://doi.org/10.12988/asb.2025.92042>
14. Hadiani M. R., Khosravi-Darani K., Rahimifard N. Optimization of As (III) and As (V) removal by *Saccharomyces cerevisiae* biomass for biosorption of critical levels in the food and water resources // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019. V. 7. №2. P. 102949. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102949>
15. Hajiyeva S., Aliyeva T., Yusifova M. The ecological state of Boyuk Shor lake of Azerbaijan // *Environmental monitoring and assessment*. 2020. V. 192. №12. P. 780. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08762-9>
16. Ivshina I. B., Kuyukina M. S., Krivoruchko A. V. Hydrocarbon-oxidizing bacteria and their potential in eco-biotechnology and bioremediation // *Microbial Resources*. Academic Press, 2017. P. 121-148. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804765-1.00006-0>
17. Kacar A., Kocyigit A., Uluturhan E. Concentration of heavy metals and investigation of bacterial toxic metal resistance in costal city sediments (Eastern Aegean Sea) // *Fresenius Environmental Bulletin*. 2016. V. 25. №1. P. 55-66.
18. Kahramanova S. S. The main sources of pollution of lakes in the city of Baku // *Academic Bulletin URALNIIPROEKT. RAASN*. 2012. V. 2. P. 22-24.
19. Lu Q., Bian Z., Tsuchiya N. Assessment of heavy metal pollution and ecological risk in river water and sediments in a historically metal mined watershed, Northeast Japan // *Environmental monitoring and assessment*. 2021. V. 193. №12. P. 814. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09601-1>
20. Naskar A., Majumder R., Goswami M. Bioaccumulation of Ni (II) on growing cells of *Bacillus* sp.: response surface modeling and mechanistic insight // *Environmental Technology & Innovation*. 2020. V. 20. P. 101057. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101057>
21. Popovych V., Skrobala V., Tyndyk O., Kaspruk O. Hydro-ecological monitoring of heavy metal pollution of water bodies in the Western Bug River basin within the mining-industrial region. Min // *Miner. Depos.* 2024. V. 18. P. 139-152. <https://doi.org/10.33271/mining18.04.139>
22. Roy R., Samanta S., Pandit S., Naaz T., Banerjee S., Rawat J. M., Saha R. P. An overview of bacteria-mediated heavy metal bioremediation strategies // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2024. V. 196. №3. P. 1712-1751. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04614-7>
23. Sharma A. et al. Heavy metal contamination in water: consequences on human health and environment // *Metals in water*. Elsevier, 2023. P. 39-52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95919-3.00015-X>

#### References:

1. Ismailov, N. M., Nadzhafova, S. I., & Gasymova, A. (2015). Apsheronskij promyshlennyj region-factory ekologicheskoy napryazhennosti. *Aridnye ekosistemy*, 21(3 (64)), 92-100. (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-083-089>
2. Nadzhafova, S. I. (2023). Vozdejstvie tyazhelykh metallov na obilie bakterij roda *Azotobacter* v sero-burykh pochvakh Apsheronского poluostrova. *Agrokimiya*, (4), 93-96. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188123040099>

3. Abd Elnabi, M. K., Elkaliny, N. E., Elyazied, M. M., Azab, S. H., Elkhailifa, S. A., Elmasry, S., ... & Mahmoud, Y. A. G. (2023). Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: a review. *Toxics*, 11(7), 580. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>
4. Aliyeva, N. T., Sadigov, R. A., Mamedova, R. I., & Ibadova, S. Y. (2023). Analysis of the content of heavy metal ions in the coastal zones of the northern part of the Apsheron peninsula. *Bulletin of the Karaganda University "Biology medicine geography Series"*, 109(1), 176-183. <https://doi.org/10.31489/2023BMG1/175-183>
5. Alabssawy, A. N., & Hashem, A. H. (2024). Bioremediation of hazardous heavy metals by marine microorganisms: a recent review. *Archives of microbiology*, 206(3), 103. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03793-5>
6. Amin, R. (2022). Determination of heavy metals of water, soil and rice grain in the adjacent areas of tannery and textile mills at savar and narayanganj. DSpace Repository.
7. Czarny, J., Staninska-Pięta, J., Piotrowska-Cyplik, A., Juzwa, W., Wolniewicz, A., & Marecik, R. (2020). Acinetobacter sp. as the key player in diesel oil degrading community exposed to PAHs and heavy metals. *Journal of hazardous materials*, 383, 121168. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121168>
8. Dahiya, U. R., Das, J., & Bano, S. (2022). Biological indicators of soil health and biomonitoring. In *Advances in bioremediation and phytoremediation for sustainable soil management: Principles, monitoring and remediation* (pp. 327-347). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89984-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89984-4_21)
9. Dave, D., Sarma, S., Parmar, P., Shukla, A., Goswami, D., Shukla, A., & Saraf, M. (2020). Microbes as a boon for the bane of heavy metals. *Environmental Sustainability*, 3(3), 233-255. <https://doi.org/10.1007/s42398-020-00112-2>
10. Dhar, K., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2023). Anoxygenic phototrophic purple non-sulfur bacteria: tool for bioremediation of hazardous environmental pollutants. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(10), 283. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03729-7>
11. Diep, P., Mahadevan, R., & Yakunin, A. F. (2018). Heavy metal removal by bioaccumulation using genetically engineered microorganisms. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 6, 157. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00157>
12. Frei, A., Verderosa, A. D., Elliott, A. G., Zuegg, J., & Blaskovich, M. A. (2023). Metals to combat antimicrobial resistance. *Nature Reviews Chemistry*, 7(3), 202-224. <https://doi.org/10.1038/s41570-023-00463-4>
13. Gasimova, A. S. (2025). Development of Biotechnologies for Cleaning of Water Bodies on the Absheron Peninsula from Organic and Inorganic Pollutants. *Advanced Studies in Biology*, 17(1), 75-82. <https://doi.org/10.12988/asb.2025.92042>
14. Hadiani, M. R., Khosravi-Darani, K., & Rahimifard, N. (2019). Optimization of As (III) and As (V) removal by *Saccharomyces cerevisiae* biomass for biosorption of critical levels in the food and water resources. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2), 102949. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102949>
15. Hajiyeva, S., Aliyeva, T., & Yusifova, M. (2020). The ecological state of Boyuk Shor lake of Azerbaijan. *Environmental monitoring and assessment*, 192(12), 780. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08762-9>
16. Ivshina, I. B., Kuyukina, M. S., & Krivoruchko, A. V. (2017). Hydrocarbon-oxidizing bacteria and their potential in eco-biotechnology and bioremediation. In *Microbial Resources* (pp. 121-148). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804765-1.00006-0>

17. Kacar, A., Kocyigit, A., & Uluturhan, E. (2016). Concentration of heavy metals and investigation of bacterial toxic metal resistance in costal city sediments (Eastern Aegean Sea). *Fresenius Environmental Bulletin*, 25(1), 55-66.
18. Kahramanova, S. S. (2012). The main sources of pollution of lakes in the city of Baku. *Academic Bulletin URALNIIPROEKT. RAASN*, 2, 22-24.
19. Lu, Q., Bian, Z., & Tsuchiya, N. (2021). Assessment of heavy metal pollution and ecological risk in river water and sediments in a historically metal mined watershed, Northeast Japan. *Environmental monitoring and assessment*, 193(12), 814. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09601-1>
20. Naskar, A., Majumder, R., & Goswami, M. (2020). Bioaccumulation of Ni (II) on growing cells of *Bacillus* sp.: response surface modeling and mechanistic insight. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101057. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101057>
21. Popovych, V., Skrobala, V., Tyndyk, O., & Kaspruk, O. (2024). Hydro-ecological monitoring of heavy metal pollution of water bodies in the Western Bug River basin within the mining-industrial region. *Min. Miner. Depos*, 18, 139-152. <https://doi.org/10.33271/mining18.04.139>
22. Roy, R., Samanta, S., Pandit, S., Naaz, T., Banerjee, S., Rawat, J. M., ... & Saha, R. P. (2024). An overview of bacteria-mediated heavy metal bioremediation strategies. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 196(3), 1712-1751. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04614-7>
23. Sharma, A., Grewal, A. S., Sharma, D., & Srivastav, A. L. (2023). Heavy metal contamination in water: consequences on human health and environment. In *Metals in water* (pp. 39-52). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95919-3.00015-X>

Поступила в редакцию  
15.07.2026 г.

Принята к публикации  
28.07.2026 г.

---

*Ссылка для цитирования:*

Гасимова А. С., Наджафова С. И., Исмаилов Н. М., Байрам К. Х. Очистка толщи воды водоемов от тяжелых металлов с использованием биотехнологий на территории Апшеронского полуострова // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №10. С. 72-83. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/131/08>

*Cite as (APA):*

Gasimova, A., Nadjafova, S., Ismaylov, N., & Bayram, K. (2026). Purification of Water Bodies from Heavy Metals using Biotechnology in the Absheron Peninsula. *Bulletin of Science and Practice*, 12(10), 72-83. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/131/08>