

УДК 504.064: 57.083

## Оценка эффективности местных штаммов почвенных бактерий в отношении удаления тяжелых металлов

*Тсегай М.К., Сухенко Л.Т.*

*Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева*

### Аннотация

*В почвенной среде ежедневно происходит регулярное осаждение значительных количеств токсичных тяжелых металлов в результате промышленной деятельности и деятельности человека, а также естественных выбросов. Сегодня биологические методы снижения загрязнения тяжелыми металлами становятся все более распространенными в качестве инновационного подхода к борьбе с загрязнением тяжелыми металлами. Целью этого исследования было выявить почвенные бактерии, способные переносить тяжелые металлы, и изучить потенциал местных бактерий в процессе биоремедиации. В ходе этого эксперимента были собраны различные образцы почвы с нескольких участков (речное побережье Rvs1, автовокзал Bt2, сельскохозяйственный участок Ag3, Мусорная свалка Gr4 и строительная площадка Cn5). Пять бактериальных штаммов были выделены из образцов почвы с использованием обычного метода серийного разведения на планшете. Морфологически различные колонии были отобраны и очищены во время инкубации. Были созданы чистые культуры бактериальных колоний и поддерживались в виде наклонных культур. В зависимости от предварительных физических, химических и морфологических характеристик изоляты Rvs1, Bt2, Ag3, Gr4 и Cn5 были сопоставлены с видами бактерий: "Proteus", "Staphylococcus", "Pseudomonas", "Bacilli" и "Klebsiella" («Протей», «Стафилококк», «Псевдомонада», «Бациллы» и «Клебсиелла») в перспективе. Бактериальные изоляты были исследованы на предмет их поглощения Cu, Cd и Pb в колб-биореакторах. Штаммы Rv1, Bt2, Ag3 и Gr4 удаляли 48,7%, 25,6%, 59,8% и 23,5% свинца соответственно. Эффективность удаления изолята Cn5 составила 35,68% для свинца и 48,53% для меди. Таким образом, данные демонстрируют, что использование местных бактерий потенциально эффективно при биоремедиации тяжелых металлов.*

**Ключевые слова:** БИОРЕМЕДИАЦИЯ, МИКРООРГАНИЗМЫ, ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ, МЕСТНЫЕ БАКТЕРИИ, ИЗОЛЯТЫ, ШТАММЫ, АБСОРБЦИЯ

### **Введение**

Рост промышленной активности человека, включая добычу полезных ископаемых, нефтепереработку и производство синтетической химии, привел к экспоненциальному увеличению количества тяжелых металлов, выбрасываемых в атмосферу, воду и почву [1]. Деградация почв под воздействием тяжелых металлов опасна для природных экосистем, здоровья человека и продовольственной безопасности [2]. Мировые сельскохозяйственные сообщества особенно обеспокоены продолжающимся отравлением сельскохозяйственных полей тяжелыми металлами. Тяжелые металлы являются высоко опасными веществами, способными сохраняться в почве в течение длительного времени [3]. Кадмий (Cd), свинец (Pb), цинк (Zn) и медь (Cu) в основном загрязняют сельскохозяйственные почвы через удобрения, в том числе органические, а также через промышленные объекты и природные источники, которые выделяют такие вещества, как хром (Cr), ртуть (Hg), мышьяк (As), никель (Ni) и др. Тяжелые металлы — это совокупность металлов и полуметаллов, отличающихся высокой плотностью и, как правило, опасными свойствами. Из всех тяжелых металлов, распространенных в окружающей среде, наибольшую озабоченность вызывают повышенные концентрации Cd и Pb, которые не представляют большого интереса для живых организмов. В результате биологических процессов тяжелые металлы накапливаются до тех пор, пока не начинают представлять серьезную угрозу здоровью животных и человека [4].

Во многих странах существуют нормативные стандарты присутствия и воздействия тяжелых металлов, а также методы смягчения последствий. Но многие из этих программ и технологий недоступны в развивающихся странах. Тяжелые металлы могут быть удалены из окружающей среды посредством физических, химических или биологических процессов [5]. Физико-химические процессы включают осаждение, ионный обмен, электролитические технологии, химическую экстракцию, микро-капсулирование полимеров, сжигание и др. Физико-химические подходы для удаления этих загрязнений используются до сих пор, хотя и оказались недостаточно эффективными [6]. В широком масштабе эти технологии очень

дороги, требуют регулярного мониторинга и контроля и даже не позволяют полностью удалить загрязнения. Биологическая обработка или биоремедиация — это превосходный альтернативный вариант лечения загрязненных участков. Несмотря на некоторые недостатки, биологическая терапия является фантастической альтернативой, поскольку она доступна по цене и выгодна для окружающей среды. Биологические подходы основаны на растениях (фиторемедиация), грибах (микоремедиация), водорослях (фикоремедиация), некоторых простейших и микробах [7]. Они эффективно используются для устранения многочисленных видов загрязнителей окружающей среды, включая различные органические химические вещества, а также тяжелые металлы. Поэтому возникает необходимость поиска таких металло-устойчивых микроорганизмов и растений для использования в биоремедиации [6].

**Цель данной работы** - выделить штаммы бактерий и продемонстрировать их способность удалять определенные тяжелые металлы (Cd, Pb и Cu) из почвы в лабораторных условиях и использовать их в экологических целях.

### **Материалы и методы**

#### *Сбор образцов почвы:*

В апреле-мае 2023 года нами были собраны пробы почвы в шести местах: автобусная остановка, мусорная свалка, стройка, сельхозугодья и пляж реки в Астрахани в Началовском районе, Российская Федерация, координаты карты [46°17'38"с.ш., 48°13'52"в.д.]. Мы собрали образцы почвы в первую очередь для выделения аэробных и/или факультативных анаэробов и мезофильных бактерий, устойчивых к тяжелым металлам. Для сбора образцов почвы мы использовали такие инструменты, как черные пластиковые пакеты, бирки, веревку, пластиковый нож, лопату, перчатки и холодильник. Мы измерили параметры почвы (температуру, влажность, pH и влажность грунта) с помощью портативного цифрового почвенного тестера. Мы также изучили топографию участка, погодные условия на момент отбора проб и другие данные, имеющие отношение к исследованию, такие как поверхностный покров (посевы, растительность) и история землепользования (применение пестицидов, разливы нефти, хвостохранилища при добыче полезных ископаемых). Мы взяли образцы

почвы с глубины около 15 см в стерильные полиэтиленовые контейнеры с помощью стерилизованного шпателя и хранили их при температуре 4 градуса Цельсия до проведения тестирования. Отбор проб почвы проводился в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017. Исходная концентрация тяжелых металлов в образцах была определена с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра (AAS) и модифицирована с учетом содержания особо тяжелых металлов (табл. 1).

Таблица 1. Предварительные физико-химические характеристики образцов почвы

Образцы почвы	Влажность (%)	Температура (°C)	pH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (мг/кг)	Электрическая проводимость Ds/cm
Rvs	32.2	23.0	7.5	48.7	2.43
BtS	23.4	21.4	6.0	31.3	4.21
AgS	37.0	23.8	7.0	51.0	3.31
GarS	23.3	21.6	6.3	29.4	1.43
CnS	18.7	21	6.8	27.3	2.02

*Примечание:* Rvs = речное побережье, BtS= автобусная остановка, AgS= сельхозугодья, GarS=, мусорная свалка, CnS, стройка.

### Выделение и скрининг бактерий

Для выделения штаммов бактерий 1 г каждого образца почвы гомогенизировали в 10 мл стерильного 0,85% физиологического раствора. Серийные разведения  $10^{-5}$  готовили в 9 мл стерильного 0,85% - физиологического раствора и инкубировали в течение ночи (**14 часов**) при 25 °C и 100 оборотах в минуту в шейкере-инкубаторе для отделения бактерий от почвы. Затем 1 мл разведенного образца наносили на поверхность чашек Петри с питательным агаром и чашки хранили в термостате (ТС-80-01-ММ-ч №515 2004г ТУ 9452-001-21489838-99) в течение 48 часов при температуре 35 °C. Из чашек случайным образом отбирали колонии, представляющие разную морфологию, и для выделения чистой культуры соответствующие колонии субкультивировали на отдельных идентичных средах [8]. Все работы по культивированию проводились в стерильных условиях. В качестве предварительного теста из загрязненной почвы в лаборатории были выделены пять штаммов бактерий (рис. 1, табл. 2), которые были исследованы на предмет их максимальной устойчивости к тяжелым металлам (МИК) (максимальная ингибирующая концентрация).

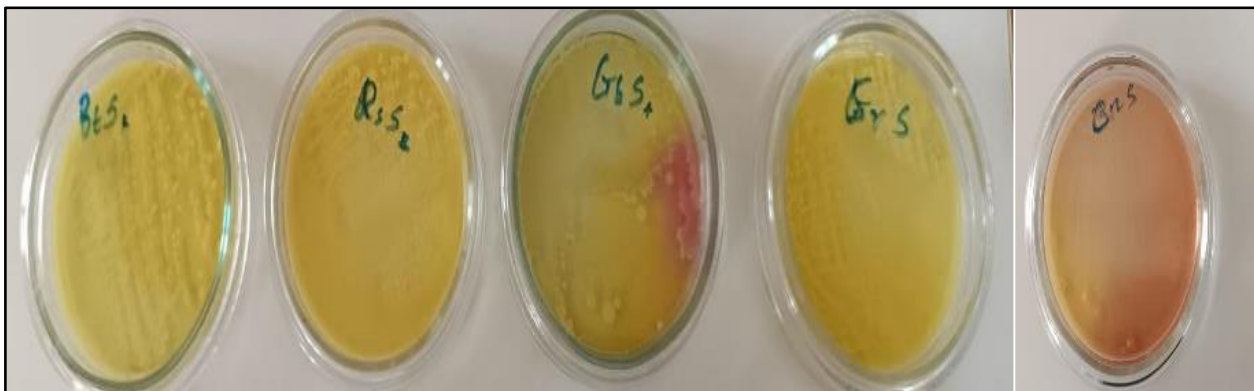


Рис. 1. Колонии бактерий

Таблица 2. Физико-химические и микроскопические характеристики изолятов

Из.	Химический тест									Микроскопический
	PH	T(°C)	О.гр.	И.	Мет.	Ц.	К.	Ок.	л.	
Rvs1	7-8	25-30	-	+	+	+	+	-	-	палочек
Vt2	6-7	35	+	-	-	-	+	-	+	виноградин
Ag3	7-8	30-35	-	-	-	+	-	+	-	палочек
Gr4	6-7	35-40	+	-	-	-	+	-	+	палочек
Cn5	7	35	-	-	-	+	+	-	+	палочек

Примечание: \*\*\*Из. =Изолирует, Т=Температура, О.гр=Окрашивание по Граму, И=Индол, Мет =Метиловый красный гхп, Ц=Цитрат, К= Каталаза, ок=оксидаза, л=лактоза.

### **Оценка максимальной переносимости бактериальных изолятов тяжелыми металлами**

Мы использовали агаровый метод для проверки устойчивости различных штаммов бактерий к воздействию тяжелых металлов. Мы добавляли по 150, 300, 400, 500 и 600 мкг/мл каждого иона тяжелого металла (никеля, свинца, хрома, кадмия и меди) отдельно в чашки Петри на питательной агаровой среде. Мы выдерживали чашки при комнатной температуре в течение трех дней, чтобы проверить на возможное загрязнение. Затем мы поместили консервированные бактериальные культуры в чашки Петри, обогащенные тяжелыми металлами, и инкубировали при температуре 35 °C в течение 24 часов. После инкубационного периода количество бактериальных клеток в чашках рассчитывали по формуле колониеобразующей единицы (КОЕ) (табл. 3). Для получения большего количества

бактериальной биомассы мы культивировали отдельные колонии, которые выдерживали максимальную концентрацию ингибирования (МИК).

$$\{КОЕ/мл = (\text{количество колоний} \times \text{коэффициент разведения}) / \text{объем культуральной чашки}\}$$

### **Оценка способности изолятов выводить тяжелые металлы**

Для эксперимента по удалению тяжелых металлов мы использовали колбу Эрленмейера вместимостью 500 мл и 100 мл питательного бульона. Культуру выделенных бактерий МІС вносили в колбы в виде логарифмической последовательности. В трех независимых колбах мы зафиксировали исходные концентрации тестируемых тяжелых металлов. При 600 мкг/мл для Cu и Pb и при 300 мкг/мл для Cd в формах  $CuSO_4 \cdot 6H_2O$ ,  $Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$  и  $CdO$ , соответственно. Были выбраны только эти тяжелые экспериментальные металлы, поскольку атомно-абсорбционный спектрофотометр, который у нас был, состоял из трех ламп с полым катодом (HCL) для определения Cu, Cd и Pb. В качестве контроля была выбрана колба, не содержащая тяжелых металлов. Мы провели эксперимент, центрифугируя колбу при 120 оборотах в минуту и выдерживая ее при температуре 37 °С. Биосорбцию тяжелых металлов оценивали как разницу между общей концентрацией тяжелых металлов, внесенных в среду, и общей концентрацией тяжелых металлов, остающихся в среде после выращивания бактерий в разные моменты времени [9]. Мы измеряли рост, используя оптическую плотность питательной среды ( $OD_{600}$ ). Мы брали пробы из колбы в разное время, чтобы количественно оценить изменение концентрации тяжелых металлов в среде.

Бактериальную биомассу получали центрифугированием питательных сред при 8000 об/мин в течение 10 минут. Биомасу (супернатант) сушили, обрабатывали 20 мл  $HNO_3$  и 15 мл  $H_2O_2$  и кипятили при температуре 95 градусов Цельсия. Затем содержимое доводили до необходимого объема с помощью неионизированной воды. Наконец, содержание тяжелых металлов в биомассе определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра (Quantum Z). Поглощение ионов металлов на грамм бактериальной биомассы рассчитывали по общей формуле, приведенной ниже:

$$Q = \frac{[C_i - C_f]v}{M} \dots \dots \dots (1)$$

Где Q - количество ионов металлов, адсорбированных на биомассе (мг/г-1),

$C_i$  - начальная концентрация ионов металлов в растворе (мг/л-1),

$C_f$  - конечная концентрация ионов металлов в растворе (мг/л-1),

$V$  - объем среды (л)

$M$  - количество биомассы, используемой в реакционной смеси (г).

Процент удаления металлов был рассчитан с использованием следующего уравнения 2:

$$Q\% = \frac{[C_i - C_f]100}{C_i} \dots\dots\dots (2)$$

$Q$  - количество адсорбированных ионов металла (%), а  $C_i$  и  $C_f$  - начальная и конечная концентрации металла в жидких средах соответственно

### Результаты и обсуждение

Микроорганизмы, которые способны переносить опасные уровни содержания тяжелых металлов, были идентифицированы из различных источников. Многие микроорганизмы обладают уникальными генетическими механизмами защиты от вредных металлов. Подобно тому, как отбираются устойчивые к антибиотикам микробы, металлы в окружающей среде также могут выбирать эти устойчивые варианты. Используемая питательная среда, условия выращивания, продолжительность инкубации, а также различные формы и концентрации металлов, используемые в тестах на переносимость, — все это может повлиять на токсичность металлов *in vitro* и затруднить стандартизацию результатов. Эти реалии означают, что не существует набора утвержденных концентраций металлов, которые характеризуют переносимость или резистентность бактерий. Мы предложили использовать концентрации каждого металла в данном контексте, которые определяют снижение на > 95% как отсутствие роста количества КОЕ/мл по отношению к общей популяции. Следовательно, хотя мы можем предположить, что этот метод может недооценивать истинное количество устойчивых к металлам бактерий, присутствующих в образце почвы, он продемонстрировал различное поведение устойчивости к металлам в отличие от общей популяции, присутствующей в почвенных контрольных средах.

На основании результатов, представленных в таблице ниже (табл. 3), из пяти отобранных для эксперимента тяжелых металлов, максимальная устойчивость штамма была к свинцу (Pb). В этом аспекте наблюдался заметный рост всех шести штаммов при концентрации более 600 мкг/мл. Этот вывод также был аналогичен оценке, проведенной Сумитра Деб и др.

(2018) [3]. Была выявлена минимальная толерантность к меди (Cu), при которой рост не превышал 150 мкг/мл или был незначительным, за исключением штамма Cn5. Мы также обнаружили, что штамм Cn5 переносит максимальные концентрации никеля (Ni) и меди более 600 мкг/мл. Помимо свинца, Rvs1 выдерживал максимальные концентрации хрома и никеля. Кроме того, было обнаружено, что ни в одном изоляте концентрация кадмия не превышала 300 мкг/мл. Мы проиллюстрировали устойчивость микроорганизмов к каждой концентрации тяжелых металлов с помощью микробной нагрузки на агар для подсчета в чашках, выраженной в КОЕ/мл. Микробная нагрузка снижалась с увеличением концентрации тяжелых металлов, что указывает на токсическое воздействие тяжелых металлов на рост микроорганизмов. Согласно результатам, приведенным ниже (табл. 3), содержание никеля в концентрации 300 мкг/мл и более было токсичным для изолятов Bt2, Ag3 и Gr4 (66,6%), а содержание меди в концентрации 300 мкг/мл и более было смертельным для изолятов Rvs1, Bt2, Ag3 и Gr4 (83,3%). Кроме того, выяснилось, что концентрация хрома и кадмия 300 мкг/мл была летальной для большинства изолятов. Раджбангси (2009) [10] также получил аналогичные результаты.

Бактериальные изоляты показали, что некоторые из них обладают множественной устойчивостью к тяжелым металлам. Они были устойчивы не только к одному металлу, но и к другим металлам. Например, изолят Rv1 был совместим с Cr, Ni и свинцом, изолят Ag3 был совместим как с Cr, так и с Pb, а изолят Cn5 был совместим с Ni, Cu и Pb. В исследовании, проведенном Иравати и др., 2017 г. [7], предполагалось, что около 52,23% бактерий обладают множественной устойчивостью к трем и более тяжелым металлам. Бактерии, обладающие множественной устойчивостью ко многим тяжелым металлам, могут быть эффективно использованы в качестве биосорбента, поскольку загрязненная металлом среда обычно была загрязнена более чем одним типом тяжелых металлов.

Таблица 3. Минимальная ингибирующая концентрация изолятов бактерий, устойчивых к тяжелым металлам

Тяжелые металлы	Концентрация (мкг/мл)	Минимальная ингибирующая концентрация изолятов (КОЕ)				
		Rvs1	Bt2	Ag3	Gr4	Cn5
Cr	150	$2.3 \cdot 10^7$	$2.5 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^7$	$4.4 \cdot 10^6$	$5.4 \cdot 10^6$
	300	$2.0 \cdot 10^7$	$9.3 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^7$	-	-
	400	$1.5 \cdot 10^7$	$3.2 \cdot 10^6$	$7.3 \cdot 10^6$	-	-



Тяжелые металлы	Концентрация (мкг/мл)	Минимальная ингибирующая концентрация изолятов (КОЕ)				
		Rvs1	Bt2	Ag3	Gr4	Cn5
	500	$8.2 \cdot 10^6$	-	$3.4 \cdot 10^6$	-	-
	600	$6.3 \cdot 10^6$	-	-	-	-
Ni	150	$2.3 \cdot 10^7$	$4.3 \cdot 10^6$	$3.3 \cdot 10^6$	$5.2 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^7$
	300	$2.0 \cdot 10^7$	-	-	-	$1.2 \cdot 10^7$
	400	$1.5 \cdot 10^7$	-	-	-	$1.1 \cdot 10^7$
	500	$8.2 \cdot 10^6$	-	-	-	$6.2 \cdot 10^6$
	600	$6.3 \cdot 10^6$	-	-	-	$5.3 \cdot 10^6$
Cu	150	-	$8.3 \cdot 10^6$	$6.4 \cdot 10^6$	$3.2 \cdot 10^6$	$2.8 \cdot 10^7$
	300	-	-	-	-	$2.0 \cdot 10^7$
	400	-	-	-	-	$1.5 \cdot 10^7$
	500	-	-	-	-	$7.2 \cdot 10^6$
	600	-	-	-	-	$4.3 \cdot 10^6$
Cd	150	$6.6 \cdot 10^6$	$5.3 \cdot 10^6$	$7.3 \cdot 10^6$	$4.4 \cdot 10^6$	$3.7 \cdot 10^6$
	300	$3.0 \cdot 10^6$	-	-	$3.0 \cdot 10^6$	-
	400	-	-	-	-	-
	500	-	-	-	-	-
	600	-	-	-	-	-
Pb	150	$2.3 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^7$	$2.6 \cdot 10^7$	$1.8 \cdot 10^7$	$2.7 \cdot 10^7$
	300	$2.0 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^7$	$2.4 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^7$	$2.2 \cdot 10^7$
	400	$1.5 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^7$	$1.7 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^7$
	500	$1.2 \cdot 10^7$	$5.2 \cdot 10^6$	$7.2 \cdot 10^6$	$5.2 \cdot 10^6$	$7.2 \cdot 10^6$
	600	$6.8 \cdot 10^6$	$5.3 \cdot 10^6$	$5.4 \cdot 10^6$	$3.3 \cdot 10^6$	$6.5 \cdot 10^6$

Примечание: (–) отсутствие бактериального роста или количество колоний менее 30.

### *Изолирует поглощение металлов*

Изолят рос медленнее в среде, обогащенной тяжелыми металлами, чем в среде, не содержащей тяжелых металлов (контроль). Изолят Cn5 хорошо рос на среде, обогащенной медью и свинцом, в то время как другие изоляты медленно росли на меди и кадмии, но быстро на свинце. Это несоответствие могло возникнуть в результате действия механизма толерантности, специально разработанного для противодействия тяжелым металлам. Большинство бактериальных родов выработали уникальные защитные механизмы, позволяющие противостоять ионам тяжелых металлов и поддерживать физиологический гомеостаз в условиях токсичности тяжелых металлов. Микроорганизмы могут взаимодействовать с металлами с помощью различных методов, таких как процессы биоаккумуляции и биосорбции [11]. Такой процесс, посредством которого живые клетки

поглощают металлы внутри своих клеток, называется биоаккумуляцией, иногда его также называют активной биосорбцией. Биосорбция позволяет прикреплять тяжелые металлы к живым клеткам, инертной биомассе или внеклеточному полимеру микробов. Как мертвая, так и активная бактериальная биомасса обладает способностью эффективно удалять тяжелые металлы из загрязненной окружающей среды, что является менее дорогостоящим вариантом по сравнению с другими технологиями удаления металлов. Механизмы адсорбции и/или переноса внутри органических компонентов позволяют эффективно удалять опасные металлы из загрязненного участка [12]. Определенные диапазоны pH и температур позволяют штаммам бактерий, устойчивым к воздействию тяжелых металлов, поглощать их. Способность бактериальных изолятов поглощать металлы была исследована при pH 7 и температуре 35°C на основании данных о скорости роста. На рис. 2 показано, что бактериальные изоляты показали способность поглощать металлы в диапазоне от 0% до 60%. На рис. 2 также показано, что в среде, содержащей 600 мкг/мл этих тяжелых металлов, изолят Cn5 достиг эффективности удаления 35,68% свинца и 48,53% меди. Содержание свинца в бульонной среде также было значительно снижено штаммами RVs1, Bt2, Ag3 и Gr4 (48,7%, 25,6%, 59,8%, и 23,5% соответственно). Было обнаружено, что изоляты RVs1, Bt2, Ag3 и Gr4 были чувствительны к кадмию и меди, и что это оказывало негативное влияние на их рост и усвоение металлов. Аналогичные результаты были отмечены Амелем Мула (2021) [13].

Кроме того, через 48 часов максимальное извлечение металлов из загрязненных сред наблюдалось при уровнях pH около 7 и 35°C. Возможно, это связано с тем, что у изолятов бактерий было достаточно времени для размножения и взаимодействия с выбранными металлами. Кроме того, по сравнению с другими изолятами, штамм Cn5 оказался более успешным в уничтожении экспериментальных металлов.

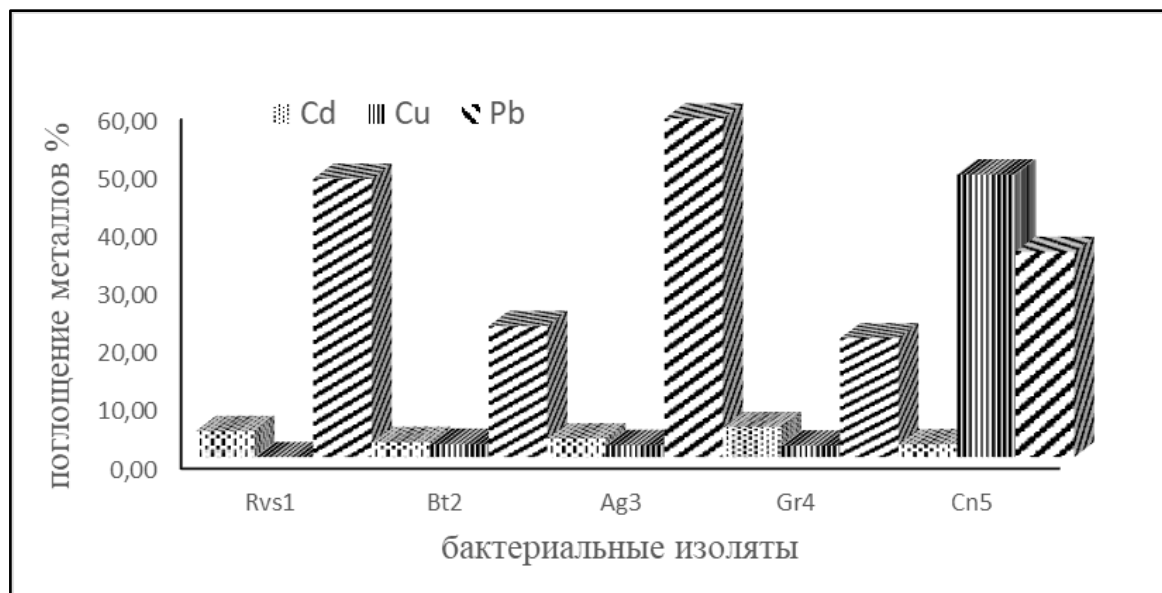


Рис. 2. Удаление отдельных тяжелых металлов (Cu, Cd и Pb) изолятами МИС в экспериментальных колбах (результаты представлены в среднем  $\pm$  SD)

### Заключение

Загрязнение тяжелыми металлами вызвано промышленными предприятиями и деятельностью человека во всем мире. Для очистки металлов было предложено несколько стратегий. Традиционные методы являются дорогостоящими, как правило, неэффективными и могут привести к изменению свойств почвы. В этой статье мы рассмотрели использование бактерий в биоремедиации тяжелых металлов для повышения эффективности процесса. Мы оцениваем реакцию живых организмов на стресс и то, как они могут помочь усовершенствовать существующие подходы.

В настоящее время существует эффективный способ борьбы с загрязнением путем биологической рекультивации загрязненных тяжелыми металлами территорий с использованием местных микроорганизмов. В ходе этого исследования было изучено наличие микроорганизмов, которые могут переносить тяжелые металлы, в образцах почвы с предполагаемых загрязненных участков. Были выделены чистые культуры бактерий, устойчивых к высоким концентрациям тяжелых металлов, и проведена оценка максимальной ингибирующей концентрации (МИК) определенных тяжелых металлов. Для определения основных характеристик изолятов были использованы несколько физических, химических и

биологических подходов. Исходя из этих основных физико-химических характеристик, были выделены следующие штаммы: proteus, staphylococcus, pseudomonas bacillus, Klebsiella видов Rvs1, Bt2, Ag3, Gr4 и Cn5 соответственно. Чтобы получить точную маркировку, требуется дополнительная характеристика, например, молекулярная. В целом, наши результаты показали, что выделенные местные штаммы бактерий проявили исключительную устойчивость к тяжелым металлам и их усвоению, что делает их идеальными кандидатами для использования при создании почвенных инокулянтов для биологического обогащения мест, загрязненных тяжелыми металлами. Кроме того, их генетические манипуляции могут открыть новые возможности для биологической реабилитации от загрязнения тяжелыми металлами.

#### Список использованных источников:

1. Atuchin V. V. et al. Microorganisms for Bioremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals // *Microorganisms*. 2023. Vol. 11, № 4. P. 1–19.
2. Pandey B., Fulekar M.H. Bioremediation technology: A new horizon for environmental clean-up // *Biol. Med*. 2012. Vol. 4, № 1. P. 51–59.
3. Nath S., Deb B., Sharma I. Isolation of toxic metal-tolerant bacteria from soil and examination of their bioaugmentation potentiality by pot studies in cadmium- and lead-contaminated soil // *Int. Microbiol. International Microbiology*, 2018. Vol. 21, № 1–2. P. 35–45.
4. Yan A. et al. Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land // *Front. Plant Sci*. 2020. Vol. 11, № April. P. 1–15.
5. Gupta A., Joia J. Microbes as Potential Tool for Remediation of Heavy Metals: A Review // *J. Microb. Biochem. Technol*. 2016. Vol. 8, № 4. P. 364–372.
6. González Henao S., Ghneim-Herrera T. Heavy Metals in Soils and the Remediation Potential of Bacteria Associated With the Plant Microbiome // *Front. Environ. Sci*. 2021. Vol. 9, № April. P. 1–17.
7. Irawati W. et al. Heavy metal tolerance in indigenous bacteria isolated from the industrial sewage in kemisan river, tangerang, banten, Indonesia // *Biodiversitas*. 2017. Vol. 18, № 4. P. 1481–1486.
8. Maity J.P. et al. Ecofriendly Heavy Metal Stabilization: Microbial Induced Mineral Precipitation (MIMP) and Biomineralization for Heavy Metals within the Contaminated Soil by Indigenous Bacteria // *Geomicrobiol. J. Taylor & Francis*, 2019. Vol. 0, № 0. P. 1–12.
9. Song B. et al. Evaluation methods for assessing effectiveness of in situ remediation of soil and sediment contaminated with organic pollutants and heavy metals // *Environ. Int. Elsevier*, 2017.

Vol. 105, № January. P. 43–55.

10. Rajbanshi A. Study on Heavy Metal Resistant Bacteria in Guheswori Sewage Treatment Plant // Our Nat. 2009. Vol. 6, № 1. P. 52–57.

11. Fulekar M.H. et al. Microbial bioremediation of heavy metals // Geomicrobiol. J. Taylor & Francis, 2023. Vol. 11, № 2. P. 103–115.

12. Abou-Shanab R.A. et al. The role of bacteria on heavy-metal extraction and uptake by plants growing on multi-metal-contaminated soils // World J. Microbiol. Biotechnol. 2008. Vol. 24, № 2. P. 253–262.

13. Moula A. et al. Enhanced Bioremediation of Heavy Metals from Phosphate Processing Wastewater Using the Indigenous Bacterium *Serratia rubidaea* NCTC12971 // Geomicrobiol. J. Taylor & Francis, 2021. Vol. 38, № 10. P. 914–923.

**Цитирование:**

Тсегай М.К., Сухенко Л.Т. Оценка эффективности местных штаммов почвенных бактерий в отношении удаления тяжелых металлов [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2024. – № 2. – Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/2/st\\_229.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/2/st_229.pdf) DOI: <https://doi.org/10.51419/202142229>.