

## ФИТОРЕМЕДИЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ЦВЕТКОВЫХ РАСТЕНИЙ ПО ОТНОШЕНИЮ К МЕДИ В УСЛОВИЯХ МОДЕЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

© 2022

**Витязь С.Н., Колосова М.М., Дрёмова М.С., Роткина Е.Б.**

*Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия (г. Кемерово, Российская Федерация)*

*Аннотация.* В работе представлены результаты изучения ряда цветковых растений на предмет их аккумулятивной способности по отношению к ионам меди в условиях лабораторного опыта. Тестовые культуры были представлены фацелией пижмолистной, горчицей белой, бархатцами мелкоцветными и смесью злаковых трав, которая состояла из овсяницы красной, райграса пастбищного и мятлика лугового в соотношении 40%, 50%, 10% соответственно. В условиях модельного опыта в почву, отобранную с территории сельскохозяйственного предприятия (чернозем выщелоченный среднесиловый тяжелосуглинистый с высоким уровнем содержания гумуса, подвижного фосфора и обменного калия и низким уровнем содержания нитратного азота, валовых и подвижных форм меди), вносили ионы меди в концентрациях 2 и 10 ПДК. Установлено, что все тестовые культуры способны в разной степени к аккумуляции ионов меди из почвы, что позволяет использовать их при фиторемедиации сельскохозяйственных земель, планируемых под органическое земледелие. Способность к аккумуляции ионов меди возрастает в ряду: горчица белая < бархатцы мелкоцветные < фацелия пижмолистная < смесь злаковых трав. Максимальное значение коэффициента аккумуляции ионов меди из почвы выявлено на варианте со смесью злаков: содержание ионов меди в почве при внесении 2 ПДК снижается на 38,8%, при внесении 10 ПДК – на 47,8%.

*Ключевые слова:* фиторемедиационный потенциал; фацелия пижмолистная; горчица белая; бархатцы мелкоцветные; смесь злаковых трав; органическое земледелие; агрохимический состав почвы; ионы тяжелых металлов; медь; коэффициент аккумуляции; коэффициент биологического поглощения.

## PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF FLOWERING PLANTS IN RELATION TO COPPER UNDER THE CONDITIONS OF A MODEL LABORATORY EXPERIMENT

© 2022

**Vityaz S.N., Kolosova M.M., Dremova M.S., Rotkina E.B.**

*Kuzbass State Agricultural Academy (Kemerovo, Russian Federation)*

*Abstract.* This paper describes the results of studying the phytoremediation potential of flowering plants in relation to copper ions in laboratory experiment conditions. The test crops were tansy-leaved phacelia, white mustard, small-flowered marigolds and a mixture of grasses consisting of red fescue, pasture ryegrass and meadow bluegrass in a ratio of 40%, 50%, 10% respectively. Under experimental conditions copper ions in concentrations of 2 and 10 MPC were introduced into the soil selected from the territory of agricultural lands (leached medium-sized heavy loamy chernozem with a high content of humus, mobile phosphorus and exchangeable potassium and a low content of nitrate nitrogen, gross and mobile forms of copper). It has been found that all the selected crops accumulated copper ions from the soil to varying degrees, which makes them suitable for phytoremediation of agricultural lands planned for organic farming. The ability to accumulate copper ions increases in a row: white mustard < small-flowered marigolds < tansy-leaved phacelia < a mixture of grasses. The maximum effect of phytoremediation of the soil in relation to copper ions has been revealed in the variant with a cereal mixture: the content of copper ions in the soil decreases by 38,8% when applying 2 MPC, by 47,8% when applying 10 MPC.

*Keywords:* phytoremediation potential; tansy-leaved phacelia; white mustard; small-flowered marigolds; mixture of grasses; organic farming; agrochemical composition of soil; heavy metal ions; copper; accumulation coefficient; biological absorption coefficient.

### **Введение**

Способность большинства растений к аккумуляции ионов меди ниже, чем для некоторых более токсичных элементов, поскольку медь является биогенным элементом, принимая непосредственное участие в жизненно важных процессах в клетках растений, поэтому ее концентрация в фитомассе контролируется самим растением [1, с. 25].

Тяжелые металлы, такие как кадмий, хром, никель, ртуть, свинец, медь, цинк и целый ряд других, относятся к приоритетным загрязнителям окружающей среды. Определение их содержания в ее основных подсистемах является обязательной составляющей при экологическом мониторинге и при сертифи-

кации сельскохозяйственной продукции. С другой стороны, все металлы являются естественными компонентами почвообразующих пород, а целый ряд металлов отнесен к биогенным микроэлементам, при недостатке которых в живых организмах возникают функциональные нарушения.

Медь является типичным биогенным элементом, она играет немаловажную роль в жизни растений, участвуя в процессах дыхания, фотосинтеза, контролируя баланс влаги (влияет на проницаемость сосудов ксилемы). Вызванные недостатком меди нарушения процессов фотосинтеза и дыхания отражаются на энергетическом обмене растения, что провоцирует каскад вторичных физиологических эффектов.

Дефицит меди в организме человека и животных может приводить к расстройствам центральной и периферической нервной системы, дисфункции иммунной системы, снижению плотности костей, заболеваниям суставов и другим негативным явлениям. Но избыточное поступление меди в живые организмы не менее опасно, чем ее дефицит, и вызывает их отравление [2–5].

Согласно действующему в Российской Федерации межгосударственному стандарту, химические вещества по степени опасности могут быть отнесены к классам высоко опасные, умеренно опасные или малоопасные не менее чем по трем показателям (токсичность, персистентность в почве или растениях, ПДК, миграция, влияние на пищевую ценность сельскохозяйственной продукции). Медь по данной классификации отнесена к классу умеренно опасные [6].

В конце XX века доля техногенной меди в окружающей среде составляла 75%, основными источниками ее эмиссии служат высокотемпературные процессы в цветной и черной металлургии, сжигание ископаемого топлива, отходы обогащения руды, медьсодержащие пестициды [1, с. 56].

Интенсивное сельское хозяйство, которое длительное время практиковалось на территории России, привело к тому, что в большинстве субъектов РФ отмечено ухудшение состояния угодий сельскохозяйственного назначения, продолжается снижение плодородия почв, снижается их устойчивость к деградации и способность к самовосстановлению. Для сохранения и восстановления «здоровья» почв в целях их использования в органической системе земледелия требуется научно обоснованный подход к поддержанию и повышению их плодородия. Поэтому исследования поведения тяжелых металлов в системе «почва – растения» позволяют ученым не только оценивать экологические риски и составлять экологические прогнозы в отношении аккумуляции тяжелых металлов в объектах окружающей среды, но и применять новые подходы и пути по их устранению, что является особенно важным при производстве сельскохозяйственной продукции. Последние годы наблюдается тенденция перехода сельхозпроизводителей к органическому земледелию, что предусматривает высокие требования к качеству почвы [1, с. 74].

Одним из наиболее перспективных методов, применяемых для восстановления земель сельскохозяйственного назначения в рамках органического сельского хозяйства, может стать фиторемедиация – метод, который является экологически безопасным и, что немаловажно, экономически выгодным. Фиторемедиация основана на способности растений к извлечению из различных компонентов окружающей среды вредных веществ и элементов, аккумуляции их в своих клетках, тканях и органах без видимых признаков угнетения или превращению их в безопасные соединения – метаболиты [7, с. 247].

Целью данного исследования явилось определение фиторемедиационного потенциала некоторых цветковых растений по отношению к ионам меди.

#### Объект и методы исследования

Исследование проводилось в условиях лаборатории кафедры ландшафтной архитектуры Кузбасской

государственной сельскохозяйственной академии в период с 15.04.2020 г. по 15.05.2020 г.

Тестовыми культурами для изучения их гиперкумулятивных возможностей в отношении ионов меди выступали декоративные, сидеральные и кормовые растения: бархатцы мелкоцветные (*Tagetes patula* L.), фацелия пижмолистная (*Phacelia tanacetifolia* Benth.), горчица белая (*Sinapis alba* L.) и смесь злаковых трав. Для смеси злаковых трав был подобран следующий ассортимент: овсяница красная (*Festuca rubra* L.), райграс пастбищный (*Lolium perenne* L.) и мятлик луговой (*Poa pratensis* L.) в соотношении 40%, 50% и 10% соответственно. Выбор в пользу данных культур был обусловлен их высокой экологической пластичностью, доступностью посевного материала для сельхозпроизводителей, простотой в технологии возделывания.

Перед посевом у семян исследуемых культур определялись биоэнергетический потенциал и лабораторная всхожесть (ГОСТ 12038-84) [8].

Для лабораторных исследований была отобрана почва с территории земель сельскохозяйственного назначения, планируемых в дальнейшем использовать под органическое земледелие. Пробы почвы брали из пахотного горизонта. Отбор проб почвы проводился методом конверта (ГОСТ 17.4.4.02-2017) [9].

В почвах, взятых для выполнения исследования, были определены основные агрохимические показатели и содержание ионов меди. Анализ почвы выполнялся в соответствии со следующими нормативными документами: массовая доля органического вещества (ГОСТ 26213-91) [10], массовая доля общего (ГОСТ Р 58596-2019) [11] и нитратного азота (ГОСТ 26951-86) [12], рН солевой вытяжки (ГОСТ 26483-85) [13], массовая доля подвижного фосфора и обменного калия (ГОСТ Р 54650-2011) [14], содержание валовых и подвижных форм меди (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98) [15–18].

Для моделирования загрязнения почвы ионами меди использовали водные растворы сульфата меди. Концентрации растворов готовили исходя из ПДК для подвижных форм меди в почвах (ПДК Cu = 3,0 мг/кг почвы), в данном опыте использовали растворы с условными концентрациями 2 и 10 ПДК.

Подготовку почв и растений для контроля в них ионов меди проводили в соответствии с методикой, предложенной А.В. Линдеманом с соавторами [19]. В соответствии с методикой в заранее приготовленные пластиковые контейнеры размером 20 × 30 × 10 см было помещено по одному килограмму почвы, которую перед внесением в неё 50 мл раствора с соответствующей концентрацией ионов меди тщательно увлажняли. В качестве контрольной группы использовались почвы с территории земель сельскохозяйственного назначения. После этого в подготовленную почву в соответствии со схемой опыта (табл. 1) в трехкратной повторности высевались исследуемые культуры.

Контроль содержания ионов меди в почве и фитомассе исследуемых культур осуществляли через 30 дней после посева растений с применением метода атомно-эмиссионного спектрального анализа при помощи спектрометра эмиссионного с индуктивно-связанной плазмой OPTIMA модель 2100 DV (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98) [15].

Коэффициенты аккумуляции ( $K_{ак}$ ), характеризующие ремедиацию почвы, определяли как отношение содержания меди в почве по окончании опыта к его содержанию в начале опыта.

Коэффициенты биологического поглощения ( $K_{бп}$ ), характеризующие фиторемедиационный потенциал растений, определяли как отношение содержания меди в золе растений к валовому содержанию меди в почве [20, с. 10].

#### Результаты исследований и их обсуждение

Качество семян культуры определяется величиной таких показателей, как всхожесть и энергия прорастания. Эти параметры в дальнейшем определяют важнейшие посевные характеристики, такие как качество всходов, их дружность и выровненность, что напрямую связано с выживаемостью растений в агрофитоценозе. Произведенные наблюдения и замеры опытных образцов растений показали высокий биоэнергетический потенциал посевного материала, энергия прорастания и лабораторная всхожесть варьировали в пределах 66–76% и 79–92% соответственно. Всхожесть семян горчицы белой в лабораторных условиях была значительно выше, чем у остальных культур. Также эта культура продемонстрировала большую энергию прорастания, о чем свидетельствуют самые высокие значения данного показателя (табл. 2).

Почва, которая использовалась в лабораторном опыте, – это чернозем выщелоченный среднемошной тяжелосуглинистой с высоким уровнем содержанием в верхнем горизонте (0–20 см) гумуса (9,1%), повышенным – подвижного фосфора (127,5 мг  $P_2O_5$ /кг почвы) и обменного калия (180,1 мг  $K_2O$ /кг почвы) и низким – нитратного азота (4,2 мг/кг почвы). Реакция почвенного раствора (согласно ГН 2.1.7.2511-09 [21]) близка к нейтральной ( $pH_{сол}$  5,7).

При сопоставлении данных о содержании валовых форм меди в исследуемой почве с литературными данными установлено, что их значение выше, чем значение кларка по А.П. Виноградову [22, с. 185], но ниже, чем это значение приведено у А. Кабата-Пендиас [23, с. 232].

Согласно действующим в Российской Федерации нормативам, ориентировочно допустимое содержание (ОДК) валовых форм меди для почв, с реакцией почвенного раствора  $>5,5$  (близкой к нейтральной), составляет 132 мг/кг. В ходе исследования установлено, что в изучаемых образцах почвы реакция почвенного раствора близка к нейтральной ( $pH_{сол}$  5,7), а содержание валовых форм меди – 25,9 мг/кг воздушно-сухой почвы, что в пять раз ниже значения ОДК для данного типа почв.

Содержание подвижных форм меди составляет менее 1% от валового и в 13 раз ниже значения ПДК (табл. 3).

После внесения ионов меди во взятые для исследования почвы с концентрациями в растворах 2 и 10 ПДК его содержание на начало опыта составило  $34,0 \pm 6,0$  мг/кг и  $65,9 \pm 9,2$  мг/кг воздушно-сухой почвы соответственно (табл. 4).

Сравнительный анализ исследуемого материала (почва и сухая фитомасса растений) по содержанию ионов меди в лабораторном опыте показал, что все использованные в данном опыте тестовые культуры

растений способны в той или иной степени к аккумуляции ионов меди из почвы, что согласуется с литературными данными [24–27] (табл. 4).

В вариантах опыта при выращивании горчицы белой отмечалось самое низкое значение показателя аккумуляции исследуемого поллютанта в растениях на контроле ( $2,5 \pm 0,4$  мг/кг воздушно-сухой фитомассы). Самое высокое значение данного показателя в сухой фитомассе обнаружилось в варианте с фацелией пажиточной ( $7,2 \pm 1,4$  мг/кг воздушно-сухой фитомассы). Данный показатель был выше в 1,9 раз по сравнению с аналогичными показателями в варианте со смесью злаковых трав и в 1,44 раза в варианте с бархатцами мелкоцветными.

Следует отметить, что с увеличением концентрации ионов меди в почве аккумулирующая способность растений к данному загрязнителю повышается во всех опытных группах.

Выявлена прямая зависимость между концентрацией ионов меди в почве и их накоплением в тканях растений. Аккумулирующая способность растений возрастала на всех вариантах опыта. Однако в ходе исследования отмечались значимые различия по вариантам опыта. Так, в вариантах при повышении концентрации ионов меди в почве 2 ПДК самые высокие аккумулятивные способности отмечались у растений семейства злаки. Показатель их аккумулятивной способности в отношении ионов меди был выше более чем в 1,6 раз по сравнению аналогичными показателями в вариантах опыта с фацелией пажиточной и бархатцами мелкоцветными и более чем в 2,8 раз – с горчицей белой. При увеличении концентрации ионов меди в почве 10 ПДК показатели аккумуляции данного поллютанта в фитомассе злаков повысились более чем в 4 раза по сравнению с аналогичными показателями в вариантах опыта с бархатцами мелкоцветными и более чем в 2,5 раза – в вариантах опыта с фацелией пажиточной и горчицей белой.

Таким образом, при низких уровнях содержания ионов меди в почвах (контроль) способность к ее аккумуляции растениями возрастает в ряду: горчица белая – смесь злаковых трав – бархатцы мелкоцветные – фацелия пажиточная, а при концентрациях 2 и 10 ПДК тенденция к минимальной аккумуляции меди сохраняется для горчицы белой, но изменяется для злаковых культур. В их фитомассе отмечено самое высокое содержание исследуемого элемента –  $17,0 \pm 4,1$  и  $38,3 \pm 7,7$  мг/кг соответственно.

Анализ результатов изменения концентрации ионов меди в почве по вариантам опыта показал, что в контрольной группе наблюдается значимое снижение её содержания только в варианте с фацелией пажиточной (25,0%). При концентрации ионов меди 2 ПДК отмечено значимое ее снижение в почве в вариантах с выращиванием злаковых трав, где исследуемый показатель в почве уменьшился на 38,8%. В вариантах опыта с фацелией пажиточной и бархатцами мелкоцветными наблюдалось снижение концентрации исследуемого поллютанта на 36%. При концентрации ионов меди 10 ПДК – также выявлено значимое снижение её содержания в почве. При выращивании смеси злаковых трав этот показатель уменьшился на 47,8%, при выращивании фацелии пажиточной – на 34,6% и при выращивании бархатцев мелкоцветных на 23,8%.

**Таблица 1** – Схема лабораторного опыта

	№ варианта опыта		
	1 (контроль)	2 (2 ПДК Cu)	3 (10 ПДК Cu)
Тестовые культуры	Фацелия пижмолистная	Фацелия пижмолистная	Фацелия пижмолистная
	Горчица белая	Горчица белая	Горчица белая
	Бархатцы мелкоцветные	Бархатцы мелкоцветные	Бархатцы мелкоцветные
	Смесь злаковых трав	Смесь злаковых трав	Смесь злаковых трав

**Таблица 2** – Биоэнергетический потенциал посевного материала

Показатели	Культуры					
	Фацелия пижмолистная	Горчица белая	Бархатцы мелкоцветные	Овсяница красная	Райграс пастбищный	Мятлик луговой
Энергия прорастания, %	72 ± 1,2	76 ± 2,1	66 ± 3,2	68 ± 2,5	70 ± 3,1	71 ± 2,7
Лабораторная всхожесть, %	90 ± 3,5	92 ± 2,6	83 ± 1,9	79 ± 3,4	85 ± 2,8	89 ± 2,5
Период определения энергии прорастания, сут.	4	3	3	7	5	7
Период определения лабораторной всхожести, сут.	10	6	7	14	10	21

**Таблица 3** – Содержание ионов меди в почве, предназначенной для лабораторных исследований в сравнении с ОДК/ПДК [21] и кларком [22; 23]

Содержание ТМ в почве опытного участка		Нормативные показатели содержания ТМ в почвах			
Валовое, мг/кг	Подвижные формы, мг/кг	ОДК вал., мг/кг	ПДК подв., мг/кг	Кларк в почвах мира, мг/кг	
				по А.П. Виноградову [22]	по А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас [23]
25,9 ± 4,4	0,23 ± 0,06	132	3	20	26

Примечание. Показатели точности ( $\pm \Delta$  при  $P = 0,95$ ).

**Таблица 4** – Сравнительный анализ проб почвы и растительного материала по содержанию ионов меди в лабораторном опыте

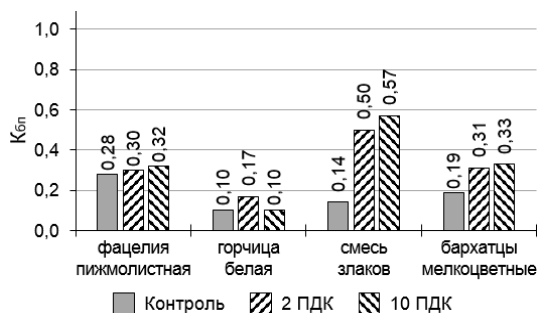
Варианты опыта		Объект исследования		
		Почва, мг/кг		Растения, мг/кг сухой фитомассы
		Начало опыта	Конец опыта	Конец опыта
Фацелия пижмолистная	Контроль	25,9 ± 4,4	19,4 ± 3,9	7,2 ± 1,4
	2 ПДК	34,0 ± 6,0	21,5 ± 3,6	10,2 ± 1,8
	10 ПДК	65,9 ± 9,2	43,1 ± 7,2	21,2 ± 4,2
Горчица белая	Контроль	25,9 ± 4,4	23,7 ± 4,1	2,5 ± 0,4
	2 ПДК	34,0 ± 6,0	28,2 ± 5,6	5,9 ± 1,2
	10 ПДК	65,9 ± 9,2	56,63 ± 9,5	6,7 ± 1,3
Смесь злаковых трав	Контроль	25,9 ± 4,4	21,0 ± 4,2	3,7 ± 2,7
	2 ПДК	34,0 ± 6,0	20,8 ± 4,7	17,0 ± 4,1
	10 ПДК	65,9 ± 9,2	34,4 ± 7,5	38,3 ± 7,7
Бархатцы мелкоцветные	Контроль	25,9 ± 4,4	21,2 ± 4,1	5,0 ± 1,0
	2 ПДК	34,0 ± 6,0	20,4 ± 5,7	10,1 ± 2,0
	10 ПДК	65,9 ± 9,2	50,2 ± 9,3	21,5 ± 4,3

Примечание. Показатели точности ( $\pm \Delta$  при  $P = 0,95$ ).

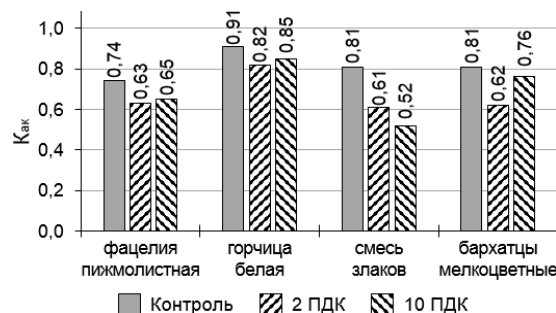
В ходе анализа полученных данных выявлена взаимосвязь между накоплением ионов меди в тканях растений и снижением их содержания в образцах почвы, что подтверждают значения коэффициентов биологического поглощения ( $K_{\text{бп}}$ ) и аккумуляции ( $K_{\text{ак}}$ ) (рис. 1, 2).

Сравнительный анализ значений коэффициентов биологического поглощения разных культур показал, что в условиях лабораторного опыта способность к аккумуляции ионов меди растениями при увеличении ее концентрации в почве возрастает. При этом установлено, что при повышении концентрации ионов меди в почве до 2 ПДК аккумулятивная способ-

ность растений на варианте с бархатцами мелкоцветными возрастает в 1,5 раза ( $K_{\text{бп}} = 0,3$ ), а на варианте со смесью злаковых трав – в 3,5 раза ( $K_{\text{бп}} = 0,5$ ) по сравнению с соответствующими контрольными группами. Дальнейшее повышение содержания ионов меди в почве до концентрации в 10 ПДК приводит к значительному увеличению аккумулятивной способности растений на варианте со смесью злаковых культур, где показатель биологического поглощения достигает значения 0,57, что в 4 раза превышает значение данного показателя по сравнению с соответствующей контрольной группой.



**Рисунок 1** – Фиторемедиационный потенциал цветковых растений по отношению к меди в лабораторных условиях ( $K_{бл}$  – коэффициент биологического поглощения)



**Рисунок 2** – Эффективность фиторемедиации почвы по отношению к меди в лабораторных условиях ( $K_{ак}$  – коэффициент аккумуляции)

В ходе исследования выявлено, что аккумулятивная способность растений в отношении ионов меди при повышении её концентрации в почве в 2 ПДК возрастает в ряду: горчица белая < фацелия пижмолистная < бархатцы мелкоцветные < смесь злаковых трав; при концентрации ионов меди в 10 ПДК – в ряду: горчица белая – бархатцы мелкоцветные < фацелия пижмолистная < смесь злаковых трав.

Анализ значений коэффициентов аккумуляции исследуемых культур показал, что при низком (фоновом) содержании ионов меди в почве значимое снижение её концентрации выявляется только на варианте с фацелией пижмолистной, что подтверждается самым низким значением коэффициента аккумуляции ( $K_{ак} = 0,74$ ). При содержании ионов меди в почве в концентрациях 2 ПДК значимое её снижение обнаруживается на вариантах со злаковой смесью и бархатцами мелкоцветными, что подтверждается соответствующими значениями  $K_{ак}$  (0,61 и 0,62). При содержании ионов меди в почве в концентрациях 10 ПДК значимое её снижение обнаруживается на варианте со злаковой смесью ( $K_{ак} = 0,52$ ).

Таким образом, максимальный эффект фиторемедиации почвы выявлен на варианте со злаковой смесью, где содержание ионов меди в почве при внесении 2 ПДК снижается на 38,8%, а при внесении 10 ПДК – на 47,8%. Полученные в ходе исследования результаты согласуются с литературными данными о высоком фиторемедиационном потенциале представителей семейства Злаки по отношению к тяжелым металлам [7].

#### Заключение

В ходе проведенного лабораторного исследования установлено, что декоративные, сидеральные и кормовые растения, благодаря своим аккумулятивным возможностям в отношении тяжелых металлов, могут использоваться в качестве фиторемедиаторов для улучшения санитарно-химических показателей почв сельскохозяйственного назначения, предназначенных для органического земледелия.

Для высоких концентраций ионов меди лучшим фитоаккумулятором является смесь злаковых трав. При увеличении концентрации ионов меди в почве до 2 ПДК относительно контроля, содержание этого тяжелого металла в растительном материале увеличивается в 3,6 раза, а при увеличении концентрации в почве до 10 ПДК – более чем в 4 раза. Значения коэффициента биологического поглощения ( $K_{бл}$ ) при этом фиксируются на уровне 0,50 и 0,57 соответственно.

При низком (фоновом) содержании ионов меди значимое снижение её концентрации в почве (25,0%)

выявлено только в варианте с фацелией пижмолистной, что подтверждается и значением коэффициента аккумуляции ( $K_{ак} = 0,74$ ).

Максимальный эффект фиторемедиации почвы выявлен на варианте со смесью злаковых трав. При содержании ионов меди в почве 2 ПДК её содержание снижается на 38,8%, а при содержании ионов меди в почве 10 ПДК – на 47,8%.

По способности к аккумуляции ионов меди тестовые культуры образуют следующий ряд: горчица белая < бархатцы мелкоцветные < фацелия пижмолистная < смесь злаковых трав.

#### Список литературы:

1. Водяницкий Ю.Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2008. 86 с.
2. Ольшанская Л.Н., Халиева А.С., Титоренко О.В., Ефремова Н.А. Влияние меди и свинца на развитие высших растений и фиторемедиацию почвы // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2013. Т. 56, № 4. С. 127–130.
3. Сусликов В.Л. Геохимическая экология болезней. В 4 т. Т. 3. Атомовитозы. М.: Гелиос АРВ, 2002. 670 с.
4. Printz B., Lutts S., Hausman J.F., Sergeant K. Copper trafficking in plants and its implication on cell wall dynamics // *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. DOI: 10.3389/fpls.2016.00601.
5. Mosa K.A., El-Naggar M., Ramamoorthy K., Alawadhi H., Elnaggar A., Wartanian S., Ibrahim E., Hani H. Copper nanoparticles induced genotoxicity, oxidative stress, and changes in superoxide dismutase (SOD) gene expression in cucumber (*Cucumis sativus*) plants // *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. DOI: 10.3389/fpls.2018.00872.
6. ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. М.: Стандартинформ, 2008. 4 с.
7. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Очистка почв от тяжелых металлов с помощью растений // Вестник Российской академии наук. 2008. Т. 78, № 3. С. 247–249.
8. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. <https://docs.cntd.ru/document/1200023365>.
9. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартинформ, 2018. 21 с.
10. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. <https://docs.cntd.ru/document/gost-26213-91>.

11. ГОСТ 26107-84. Почвы. Методы определения общего азота [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. <https://docs.cntd.ru/document/gost-26107-84>.
12. ГОСТ 26951-86. Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. <https://docs.cntd.ru/document/gost-26951-86>.
13. ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. <https://docs.cntd.ru/document/1200023490>.
14. ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. <https://docs.cntd.ru/document/gost-r-54650-2011>.
15. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Методика выполнения измерения содержания металлов в твердых объектах (почва, компосты, кеки, осадки сточных вод, пробы растительного происхождения) методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. М., 1998. 29 с.
16. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1989. 58 с.
17. СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 16 с.
18. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 19.01.2006. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.
19. Линдемман А.В., Шведова Л.В., Тукумова Н.В., Невский А.В. Фиторемедиация почв, содержащих тяжелые металлы // Экология и промышленность России. 2008. № 9. С. 45–47.
20. Селюкова С.В. Экологическая оценка содержания свинца, кадмия, ртути и мышьяка в агроэкосистемах юго-западной части Центрально-Черноземного района России: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. Белгород, 2019. 25 с.
21. ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 10 с.
22. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 259 с.
23. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / пер. англ. М.: Мир, 1989. 439 с.
24. Киричкова И.В. Фиторемедиационная способность многолетних трав в условиях черноземных почв // Реputациология. 2017. № 1 (43). С. 14–18.
25. Поцепай С.Н., Семёнова Ю.Г., Бельченко С.А., Анищенко Л.Н. К исследованию разнообразия сеgetальной и рудеральной растительности как основы фиторемедиации земель южного Нечерноземья РФ // Научное обозрение. Биологические науки. 2017. № 1. С. 135–140.
26. Волков К.С., Иванова Е.М., Велисар С.Г., Куликова А.Л., Кузнецова Н.А., Холодова В.П., Кузнецов В.В. Возможности использования растений различных семейств в целях фиторемедиации загрязненных медью территорий // Проблемы региональной экологии. 2013. № 1. С. 97–101.
27. Baycu G., Tolunay D., Ozden H., Csatarı I., Karadag S., Agba T., Rognes S.E. An abandoned copper mining site in Cyprus and assessment of metal concentrations in plants and soil // International Journal of Phytoremediation. 2015. Vol. 17, iss. 7. P. 622–631. DOI: 10.1080/15226514.2014.922929.

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
<p><b>Витязь Светлана Николаевна</b>, кандидат биологических наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры; Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия (г. Кемерово, Российская Федерация). E-mail: svetlana_vityaz@mail.ru.</p>	<p><b>Vityaz Svetlana Nikolaevna</b>, candidate of biological sciences, associate professor of Landscape Architecture Department; Kuzbass State Agricultural Academy (Kemerovo, Russian Federation). E-mail: svetlana_vityaz@mail.ru.</p>
<p><b>Колосова Марина Михайловна</b>, кандидат химических наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры; Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия (г. Кемерово, Российская Федерация). E-mail: komar.54@yandex.ru.</p>	<p><b>Kolosova Marina Mikhailovna</b>, candidate of chemical sciences, associate professor of Landscape Architecture Department; Kuzbass State Agricultural Academy (Kemerovo, Russian Federation). E-mail: komar.54@yandex.ru.</p>
<p><b>Дрёмова Мария Сергеевна</b>, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры; Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия (г. Кемерово, Российская Федерация). E-mail: dremova_maria@mail.ru.</p>	<p><b>Dremova Maria Sergeevna</b>, candidate of agricultural sciences, associate professor of Landscape Architecture Department; Kuzbass State Agricultural Academy (Kemerovo, Russian Federation). E-mail: dremova_maria@mail.ru.</p>
<p><b>Роткина Екатерина Борисовна</b>, старший преподаватель кафедры ландшафтной архитектуры; Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия (г. Кемерово, Российская Федерация). E-mail: k.rot@mail.ru.</p>	<p><b>Rotkina Ekaterina Borisovna</b>, senior lecturer of Landscape Architecture Department; Kuzbass State Agricultural Academy (Kemerovo, Russian Federation). E-mail: k.rot@mail.ru.</p>

**Для цитирования:**

Витязь С.Н., Колосова М.М., Дрёмова М.С., Роткина Е.Б. Фиторемедиационный потенциал цветковых растений по отношению к меди в условиях модельного лабораторного эксперимента // Самарский научный вестник. 2022. Т. 11, № 2. С. 35–40. DOI: 10.55355/snv2022112104.