

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЕ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЕЁ РАЗВИТИЯ

Т.Г. Крупнова<sup>1</sup>, О.В. Ракова<sup>1</sup>, М.А. Попкова<sup>1</sup>, С.В. Гаврилкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия

В современном мире в условиях быстрого развития промышленности усиливается загрязнение окружающей среды тяжёлыми металлами в масштабах, не свойственных природе. При поступлении в почву в больших количествах тяжёлые металлы оказывают влияние на биологические и биохимические свойства почв, на изменение в них количества подвижных форм питательных веществ. В загрязнённых почвах поглощение тяжёлых металлов растениями приводит к накоплению металлов в съедобных частях овощей или сельскохозяйственных культур. Общую загрязнённость почвы характеризует валовое содержание тяжёлых металлов, а доступность элементов для растений определяется их подвижными формами. Согласно проведённому расчёту геоаккумуляционного индекса для исследуемых элементов был составлен следующий ряд металлов по вкладу в загрязнение почв:  $Cu > Zn > Fe > Mn$ .

Количественной мерой интенсивности накопления химических элементов растениями из почвы является коэффициент накопления, отражающий степень биофильности элементов, а также интенсивность их вовлечения в биологический круговорот. Аккумуляционные способности корней и побегов по отношению к цинку на разных стадиях роста пшеницы уменьшаются в следующем порядке: колошение > созревание > трубкование. Однако для меди наблюдается постепенное снижение аккумуляции в корнях на разных стадиях роста пшеницы в следующем порядке: колошение > трубкование > созревание; в побегах – созревание > трубкование > колошение. По результатам исследования были составлены ряды металлов по способности аккумуляции озимой пшеницей. Рассчитанное значение коэффициента перехода позволяет сформулировать следующие выводы: железо достигает максимального значения коэффициента на стадии трубкования (7,764) и имеет наибольшее значение среди всех элементов и стадий роста; цинк и марганец достигают максимального значения коэффициента на стадии колошения (1,765 и 2,193 соответственно); медь – на стадии созревания (1,143).

*Ключевые слова:* тяжёлые металлы, загрязнение окружающей среды, озимая пшеница

### Введение

Зерновые культуры распространены по всему миру и имеют важнейшее значение для населения земного шара в самых разнообразных географических условиях. Среди зерновых культур, высеваемых в России, наибольшую ценность представляет пшеница, посевная площадь которой, достигает 42–45 % от всей посевной площади под зерновые [1, 2].

В государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных культур, допущенных к использованию в Уральском регионе, входят следующие сорта озимой пшеницы: Безенчукская 380, Волжская К, Московская 39, Альбина 45, Башкирская 10, Умка, Губернатор Дона, Губерния, Доминанта, Донэко, Кинельская 4, Колос Оренбуржья, Комсомольская 56, Комсомольская 75, Мироновская 808, Новоершовская, Омская, Оренбургская 105, Оренбургская 14, Пионерская 32, Поволжская 86, Саратовская 90, Северодонецкая юбилейная, Тарасовская остистая [3].

Среди токсичных веществ по масштабам загрязнения и воздействию на биологические объекты тяжёлым металлам отводится особое место. Принадлежность большинства из них к рассе-

янным химическим элементам способствует загрязнению ими почвенного покрова, гидросферы, атмосферы, а также сельскохозяйственной продукции [4–7].

В результате чего увеличение концентрации тяжелых металлов в окружающей среде в последствии как естественного, так и антропогенного поступления может приобретать глобальный характер [8].

К тяжелым относят металлы, плотность которые выше  $5 \text{ г/см}^3$ . Они являются микроэлементами, поскольку их количество в животных и растениях не превышает  $10^{-3}$ – $10^{-5}$  %. В окружающую среду они проникают в составе сточных вод предприятий промышленности, вместе с выхлопными газами автотранспорта, в результате орошения сточными водами, а также из-за использования удобрений и пестицидов. Сточные воды, используемые для орошения, загрязняют почвы, имея в своем составе такие тяжелые металлы, как Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn. В составе фосфорных удобрений на поля вносят As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Pb, Zn; в результате известкования привносятся Cd, Hg, Mn, Pb, Zn; вместе с азотными удобрениями – As, Cd, Cr, Co, Hg, Ni, Pb, Sn, Zn; с органическими удобрениями – As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn; в составе пестицидов содержится As, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn.

При поступлении в почву в больших количествах тяжёлые металлы оказывают влияние на биологические и биохимические свойства почв, на изменение в них количества подвижных форм питательных веществ. Загрязнение почвы тяжёлыми металлами влияет на трансформацию азотсодержащих веществ, подавляет активность азотфиксации и т. д. Наибольшее давление на эти процессы оказывает кадмий, несколько меньше медь, затем цинк и свинец [9].

Весьма активно ионы многих тяжёлых металлов поглощаются органическим веществом почвы, представляющим отмершие части растений, животных и микробную биомассу [10].

В нормальных условиях среды содержание микроэлементов в растениях невелико (около 0,001 % от сухой массы клетки, а иногда и ниже), однако при увеличении их концентрации в окружающей природной среде, как правило, происходит накопление микроэлементов в тканях растений, что влечет за собой угрозу их жизнедеятельности [11, 12]. Содержание микроэлементов в растениях зависит от физиологических потребностей и экологических условий произрастания. В естественных, природных биоценозах микроэлементный состав растений определяется не только уровнем концентрации, но и соотношением каждого отдельного микроэлемента с другими составляющими [13].

Тяжёлые металлы оказывают сильное воздействие на поступление микроэлементов в пшеницу и их аккумуляцию в растительных тканях. Токсичное действие тяжёлого металла может приводить к относительному увеличению поступления микроэлементов в надземные органы по сравнению с корнем [14].

Установлено, что влияние тяжёлых металлов на характер прорастания семян и рост проростков озимой пшеницы зависит от их доз, природы металла, его содержания в почве и продолжительности воздействия. Поступая в растения, тяжёлые металлы распределяются в их органах и тканях весьма неравномерно, следовательно, изучение особенностей накопления тяжёлых металлов в растениях может помочь ограничить их поступление в организм человека. Поэтому изучение состава растений на содержание тяжёлых металлов вызывает не только большой научный, но и практический интерес [7, 15].

Растения способны накапливать металлы в тканях или на поверхности, являясь промежуточным звеном в цепи «почва – растение – животное – человек» [16–18].

Отмечено, что при наличии тяжелых металлов в окружающей среде существенно снижаются процессы роста и развития растений, их фотосинтетическая деятельность, нарушаются процессы транспирации, дыхания, перемещения веществ и т. д. [19–21].

Поэтому установление закономерностей поглощения и накопления тяжёлых металлов сельскохозяйственными растениями в конкретных почвенно-климатических условиях, а также распределение этих элементов по растению имеет не только теоретическое, но и практическое значение для прогнозирования уровней загрязнения и получения экологически безопасной продукции сельскохозяйственного производства [9, 22].

Проблема избыточного накопления данных элементов в растениях затрагивает широкий круг вопросов, касающихся механизмов поглощения, транспорта, метаболизма и распределения их в органах и тканях, что тесным образом связано с видовыми и сортовыми особенностями возде-

ываемых культур, с ролью экологических и антропогенных факторов, с разработкой нормативов допустимых количеств тяжёлых металлов в урожае и продуктах, с разработкой эффективных технологий и приёмов по уменьшению их уровня в продуктах питания и кормах.

Целью работы было определение зон локализации тяжёлых металлов, распределения по органам и тканям пшеницы на различных стадиях роста в реальных полевых условиях. Получение таких сведений позволит подойти к решению задач прогноза аккумуляции тяжёлых металлов в важнейших сельскохозяйственных культурах при различных уровнях загрязнения окружающей среды.

### **Экспериментальная часть**

Объектами изучения являлись почва прикорневой сферы и фитомасса озимой пшеницы сорта Омская и Оренбургская.

Согласно методике РД 52.18.191-89, отбор проб производился в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-83, «Методическими рекомендациями по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами» и «Временными методическими рекомендациями по контролю загрязнения почв». Пробы отбирались с трёх горизонтов: 0–10 мм, 10–20 мм и 20–30 мм пластмассовым инструментом.

В качестве ёмкости для хранения и транспортировки использовались хлопчатобумажные мешочки с ремешком для утяжки горлышка в целях исключения попадания инородных предметов и обеспечения сохранности пробы, а также с биркой, на которой дублируется информация из сопроводительного талона. На всех этапах отбора проб и их подготовки исключались воздействия на пробу со стороны окружающей среды, вторичных загрязнений, атмосферных осадков. Отобранные пробы почвы регистрировались в журнале и нумеровались [23].

Пробы, отобранные для анализа, упаковывались, транспортировались и хранились в ёмкостях из химически нейтрального материала [24]. Далее отобранные пробы поступали на анализ, где производилась очистка от механических примесей (корни растений, камни, мусор). После очистки отбиралась проба массой 0,2 кг методом квартования. Для этого проба распределялась равномерно на плоской поверхности и делилась по диагоналям на четыре части, удалялись любые две противоположные части, а оставшиеся – смешивались. Процедура повторялась до получения пробы необходимой массы в 0,2 кг.

Полученная проба перетиралась и доводилась до однородного состояния в ступке, затем просеивалась через капроновое сито с диаметром отверстий 1 мм, скомкивавшиеся части пробы повторно перетирались в ступке и просеивались через сито. После чего отбирались навески для проведения анализа.

Содержание железа, марганца, цинка и меди в озимой пшенице и почвах определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрометра Analist 400 (Perkin Elmer) в Центре коллективного пользования ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН г. Миасс. Аттестат аккредитации № ААС.А.00330 до 11.02.2026 г. Анализ проводился на второй, третьей и четвёртой стадии роста озимой пшеницы: трубкование (удлинение стебля), колошение и созревание. Для сравнения был проведён анализ для двух сортов пшеницы (Омская и Оренбургская). Концентрацию меди и цинка рассматривали на разных уровнях почвы (валовое содержание и подвижные формы).

Полевые исследования проводили на полях Еткульского района Челябинской области. На территории района преобладают выщелоченные и оподзоленные чернозёмы, а в восточной части качество почвы ухудшается солонцами и солончаками, в целом преобладают среднегумусовые почвы. Поля находятся у автомагистрали федерального значения Екатеринбург – Астана и обрабатываются гербицидами «Полгар» и «Пришанс». Кроме того, в исследуемом районе расположены промышленные предприятия, но в результате того, что воздушные массы перемещаются на достаточно большие расстояния и их направление движения зависит от розы ветров, нельзя сказать, какие именно промышленные объекты вносят наибольший вклад в загрязнение почв сельскохозяйственных угодий. Ближайшие источники загрязнения исследуемых полей представлены на рис. 1.

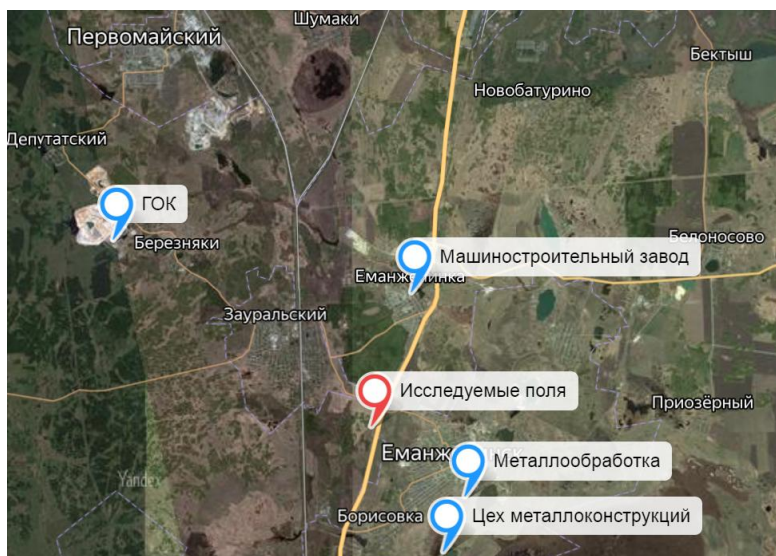


Рис. 1. Потенциальные источники загрязнений

На всех этапах пробоотбора и подготовки были исключены воздействия на пробу вторичных загрязнений, атмосферных осадков. На поле выделяли 5 участков, расположенных по диагонали, площадью 1 м<sup>2</sup> (рис. 2). Для получения объединённой пробы растений массой 0,5–1 кг натуральной влажности в соответствии с методическими рекомендациями были отобраны не менее 8–10 точечных проб.



Рис. 2. Карта-схема мест отбора проб

С каждого участка отбирали не менее 5 растений, также расположенных по диагонали и в центре экспериментального участка, у которых срезали надземную часть острым ножом и помещали в полиэтиленовую плёнку (пакет). Если на нижней части растения находилась почва, то надземная часть срезалась на 3–5 см выше поверхности почвы. Корни сразу отделяли и также помещали в полиэтиленовый пакет, на котором располагалась бирка с указанием информации о времени и месте отбора проб. Также данная информация дублировалась в лабораторном журнале.

Впоследствии были сформированы объединённые пробы для каждого поля, состоящие из точечных проб надземной части растений или отдельных частей – стеблей, листьев, зёрен. В лаборатории растения промывали под проточной водой, при этом наиболее тщательно обрабатывали корни растений, освобождая их от почвенных частичек. После сушки стебли, корни и колосья измельчали и распределяли по чашкам Петри для дальнейшей вакуумной сушки при температуре 60 °С в течение суток. Если на данной стадии развития у растения были цветки, трубки или зёрна, то их отделяли и сушили отдельно. После вакуумной сушки, непосредственно перед анализом, пробы перетирались в ступке до однородного состояния, после чего уже отбирались навески для проведения анализа. Отобранные пробы нумеровали и регистрировали в лабораторном журнале (рис. 3).



Рис. 3. Подготовленные к анализу пробы пшеницы

В отобранных образцах определяли индекс геоаккумуляции. Индекс геоаккумуляции ( $I_{geo}$ ) – метод, используемый для оценки степени загрязнения почвогрунта, был первоначально определен Мюллером и широко использовался в исследованиях содержания тяжелых металлов в почве, рассчитывается по формуле:

$$I_{geo} = \ln \frac{C_n}{1,5C_{\phi}}$$

где  $C_n$  – это вычисленная в лабораторных условиях концентрация элемента в почве района исследования;  $C_{\phi}$  – геохимическое фоновое значение концентрации элемента, учитывающее особенности рассеивания элемента в данном регионе.

Данный метод основывается на разработанной международной ассоциацией исследователей IAWR классификации загрязнения, выделяющей 7 классов (табл. 1).

Таблица 1

Градации интенсивности загрязнения почв в зависимости от значений индекса геоаккумуляции [25]

Класс	$I_{geo}$	Уровень загрязнённости
0	$\leq 0$	Незагрязнённый
1	0–1	Между незагрязнённым и умеренно загрязнённым
2	1–2	Умеренно загрязнённый
3	2–3	Средне загрязнённый
4	3–4	Сильно загрязнённый
5	4–5	Между сильно и чрезмерно загрязнённым
6	$\geq 5$	Чрезмерно загрязнённый

Для расчёта индекса геоаккумуляции параметр «геохимическое фоновое значение концентрации элемента» приведён в табл. 2.

Таблица 2

Средние концентрации тяжёлых металлов в почве, мг/кг [26]

Элемент	Fe	Mn	Zn	Cu
$C_{\phi}$	3800	1100	20	4

В отобранных образцах также определяли коэффициент биологического поглощения (коэффициент биоаккумуляции, концентрирования) и коэффициенты перехода металлов из корней в стебли. Биоаккумуляция и коэффициент перехода указывают на способность растения переносить и накапливать тяжёлые металлы в своих органах, эти параметры рассчитываются с использованием следующих соотношений [27–29].

$$K_{\text{БК}} = \frac{C_{\text{корни}}}{C_{\text{почва}}},$$

где  $C_{\text{корни}}$  – содержание металла в корне;  $C_{\text{почва}}$  – содержание металла в почве.

$$K_{\text{БП}} = \frac{C_{\text{побеги}}}{C_{\text{почва}}},$$

где  $C_{\text{побеги}}$  – содержание металла в побеге.

$$K_{\text{П}} = \frac{C_{\text{побеги}}}{C_{\text{корни}}}.$$

### Обсуждение результатов

Общую загрязнённость почвы характеризует валовое содержание тяжёлых металлов, а доступность элементов для растений определяется их подвижными формами. Загрязнение подвижными формами тяжёлых металлов является наиболее опасным явлением, так как именно в такой форме они могут ассимилироваться растениями и поступать в пищевые цепи. Концентрация в почве подвижных форм цинка не должна превышать 23,0 мг/кг, меди – 3,0 мг/кг. Результаты анализа по микроэлементам представлены на рис. 4.

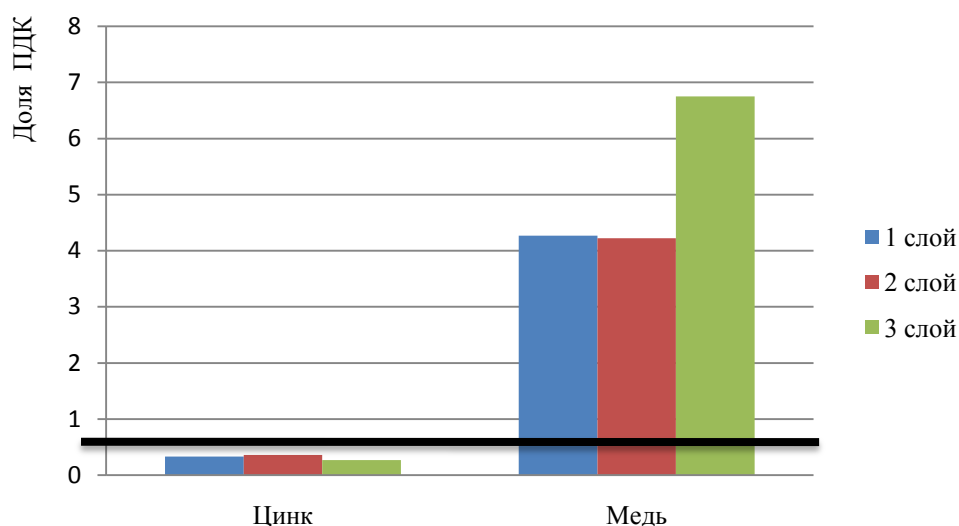


Рис. 4. Соотношение концентраций подвижных форм ТМ и соответствующих ПДК в почвах

В исследуемых почвах превышений допустимых концентраций подвижных форм по цинку не обнаружено (согласно ГН 2.1.7.2041-06). Однако было отмечено превышение ПДК по меди во всех слоях, причём его содержание вниз по профилю сначала незначительно уменьшилось, а затем увеличилось в 1,6 раза. Такое распределение меди по почвенному горизонту можно объяснить тем, что основная доля поступивших в верхние горизонты тяжёлых металлов продолжает пребывать в свободном состоянии и под влиянием тока почвенной влаги перемещается в нижележащие горизонты вплоть до генетического горизонта и почвообразующих пород, чему дополнительно способствует легкий механический состав почв, обеспечивая высокую скорость фильтрации почвенной влаги.

Валовые формы тяжёлых металлов представляются как потенциальный резерв подвижных элементов, которые активно участвуют в биологическом круговороте. Они характеризуют общую загрязнённость почвы, но не отражают степени доступности элементов для растений. Концентрация в почве валовых форм цинка не должна превышать 100 мг/кг, меди – 55 мг/кг, марганца – 1500 мг/кг. ПДК для железа не установлено, поэтому оно не учитывается. Результаты химических анализов на валовое содержание тяжёлых металлов на разных стадиях роста озимой пшеницы представлены на рис. 5.

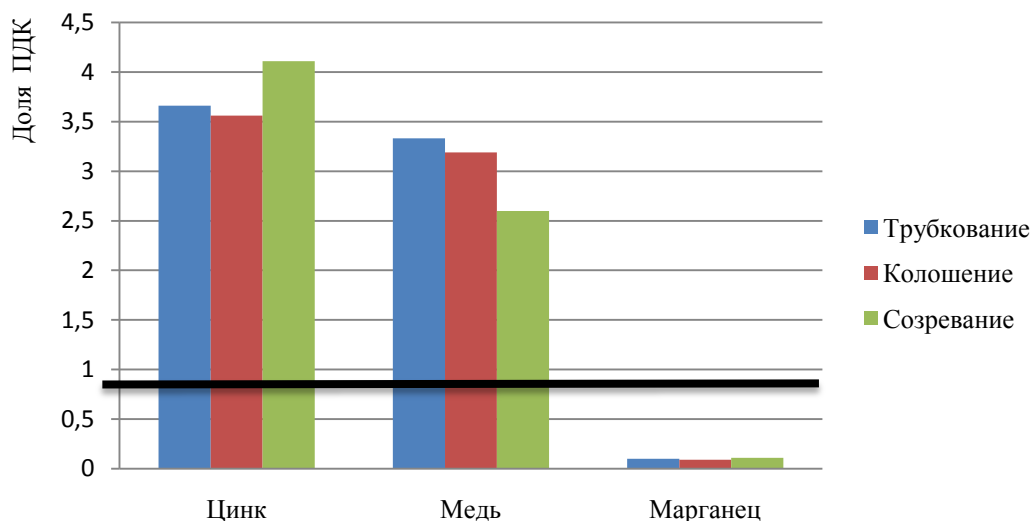


Рис. 5. Соотношение концентраций валовых форм ТМ и соответствующих ПДК в почвах

Таким образом, анализируя данные диаграммы на валовое содержание исследуемых металлов в почве, можно сделать заключение, что почвы загрязнены цинком и медью, их значения превышают ПДК в 2–4 раза на всех стадиях роста пшеницы. По марганцу превышений допустимых концентраций не обнаружено. Данные химического анализа позволяют сделать вывод о том, что на экспериментальных полях Еткульского района наблюдались превышения валовых концентраций тяжёлых металлов (цинк и медь) в почве, элементарный состав при этом варьировал в пространстве и времени, зависел от количественных показателей аккумулированных горизонтами почв тяжёлых металлов, от физических и химических свойств почв. Всё перечисленное свидетельствует о большой зависимости содержания тяжёлых металлов от различных факторов, обуславливающих попадание, перемещение, превращение и выведение их из почвы, которая к тому же обладает избирательной накопительной способностью к определённым металлам.

Согласно проведённому расчёту геоаккумуляционного индекса (Igeo) для исследуемых элементов был составлен следующий ряд металлов по вкладу в загрязнение почв: Cu > Zn > Fe > Mn (рис. 6).

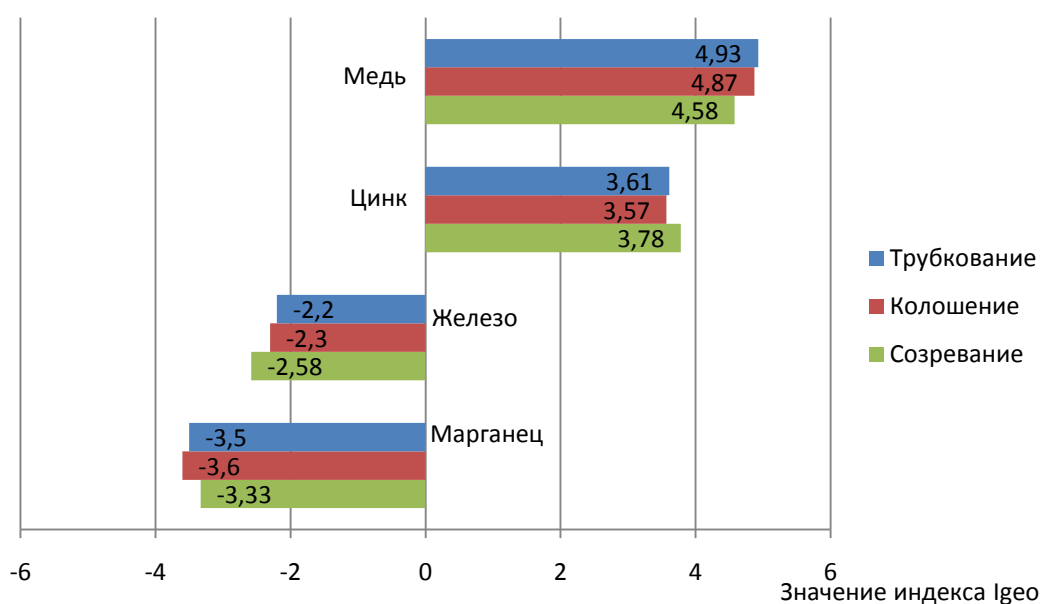


Рис. 6. Индексы геоаккумуляции тяжёлых металлов в почве

Расчёт индексов геоаккумуляции подтвердил, что почвы исследуемых полей загрязнены медью и цинком. Наибольший вклад вносит медь: на всех стадиях роста пшеницы загрязнение почвы этим элементом соответствует уровню между сильно и чрезмерно загрязнённым, хоть её содержание и уменьшается на каждой последующей стадии развития.

Содержание цинка также находится на высоком уровне, но его уровень загрязнения на класс выше уровня загрязнения медью, что соответствует сильно загрязнённым почвам. При переходе от стадии трубкования к стадии колошения степень накопления цинка незначительно уменьшается, а на следующей стадии достигает максимального значения.

Концентрация железа и марганца находится на низком уровне. При этом значение индекса геоаккумуляции по железу уменьшается на всех стадиях роста; по марганцу – сначала уменьшается к стадии колошения, а после, как и цинк, достигает максимального значения на стадии созревания.

Таким образом, к стадии созревания пшеницы в почве наблюдается снижение содержания меди и железа, а цинка и марганца – возрастание. Откуда следует, что увеличение в почве содержания одних металлов препятствует усвоению других и что пшеница в разной степени аккумулирует металлы в зависимости от своих потребностей в определённые периоды развития, тем самым уменьшая их концентрацию в почве.

Количественной мерой интенсивности накопления химических элементов растениями из почвы является коэффициент биоаккумуляции ( $K_{ок}$  и  $K_{оп}$ ), отражающий степень биофильности элементов, а также интенсивность их вовлечения в биологический круговорот. Аккумуляционные способности корней и побегов по отношению к цинку на разных стадиях роста пшеницы уменьшаются в следующем порядке: колошение > созревание > трубкование. Однако для меди наблюдается постепенное снижение аккумуляции в корнях на разных стадиях роста пшеницы в следующем порядке: колошение > трубкование > созревание; в побегах – созревание > трубкование > колошение. Для металла характерен барьерный тип накопления на стадиях трубкования и колошения: лучше всего корень препятствует поступлению элемента в побег на стадии колошения. На стадии созревания эти функции ухудшаются, и барьер почти исчезает. Таким образом, при созревании пшеницы цинк и медь в высокой степени аккумулируются в побегах, а именно в колосьях.

Сравнение двух сортов показало, что Оренбургская пшеница имеет лучшие барьерные показатели при переходе цинка, марганца и железа из почвы в надземную часть растения, аккумулируя данные металлы в корнях.

Кроме того, для каждого тяжелого металла были рассчитаны коэффициенты перехода ( $K_n$ ) от корня к побегу. Согласно рассчитанному коэффициенту перехода (рис. 7), можно сделать выводы, что максимально железо переходит из корня в побег на стадии трубкования (7,764), цинк и марганец достигают максимальных значений коэффициента на стадии колошения (1,765 и 2,193 соответственно); медь – на стадии созревания (1,143).

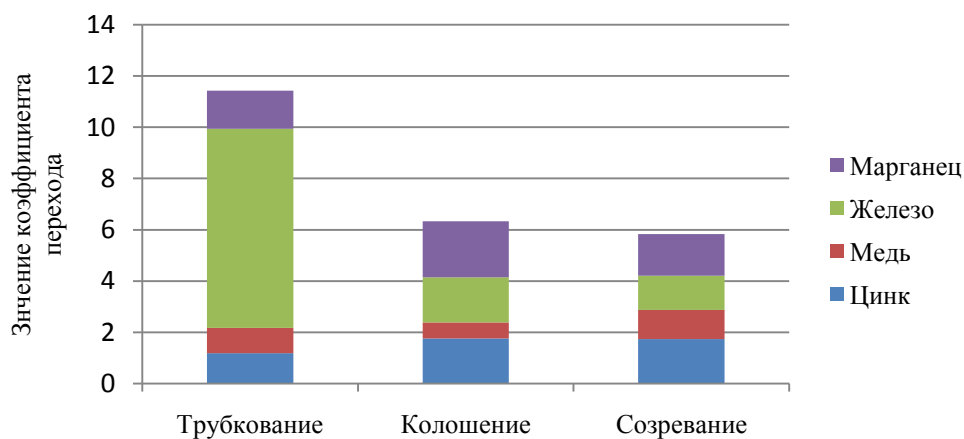


Рис. 7. Коэффициенты перехода металлов из корня в побег на разных стадиях роста пшеницы



Незначительная биоаккумуляция металлов пшеницей из почвы при значениях коэффициентов перехода больше 1 может указывать на то, что превышение концентраций металлов в надземной части растения над концентрациями в корнях может быть обусловлено поглощением тяжёлых металлов не только из почвы, но и непосредственно из атмосферного воздуха.

### Заключение

Нашими исследованиями подробно задокументировано пространственное распределение и временные вариации таких металлов, как Fe, Zn, Cu и Mn в озимой пшенице.

Зная распределение тяжёлых металлов в отдельных зонах и тканях различных органах пшеницы, можно оценить их потенциальную и реальную опасность в зависимости от объёма, который они занимают в данном органе.

Исследование показало, что Fe, Zn, Cu и Mn в большей степени концентрируются в надземной части пшеницы, это может быть обусловлено тем, что стебли и колосья пшеницы поглощают металлы из загрязнённого атмосферного воздуха.

В результате проведённой работы было установлено, что в почвах, на которых выращиваются злаковые культуры, присутствуют валовые формы тяжёлых металлов (меди и цинка) в количествах, превышающих ПДК. Это указывает на необходимость принятия мер по уменьшению содержания этих элементов в почвах сельскохозяйственного назначения несмотря на то, что в составе исследуемых образцов пшеницы не выявлено превышения ПДК по тяжелым металлам.

### Благодарности

Благодарим ФГБУ «Челябинскагрохимрадиология» и студентов кафедры экологии и химической технологии (ЮУрГУ) за помощь в осуществлении пробоотбора, а также директора ФГБУ «Челябинскагрохимрадиология» Денисова Юрия Николаевича за содействие при проведении исследования и написании статьи.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-20006 и при финансовой поддержке Правительства Челябинской области.**

### Список источников

1. Соколова И.А. // Вестник КурГСХА. 2012. № 5. С. 44. EDN: RMRKDZ.
2. Посевные площади пшеницы в России. Итоги 2019 года. <https://agrovesti.net/lib/industries/cereals/posevnye-ploshchadi-pshenitsy-v-rossii-itogi-2019-goda.html>
3. Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных культур, допущенных к использованию по Республике Башкортостан и Уральскому региону на 2016 год [Текст]. М.: Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Министерство сельского хозяйства Республики Башкортостан, Филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Государственная комиссия Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений» по Республике Башкортостан (филиал ФГБУ «Госсорткомиссия» по Республике Башкортостан); [материал подготовки: Леонтьев И. П. и др.]. Уфа. 2016. 103 с.
4. Башкин В.Н., Касимов Н.С. Биогеохимия. М.: Научный мир, 2004. 648 с.
5. Hassan Z., Aarts M.G.M. // Environ. Exp. Biol. 2011. V. 72. P. 53. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.04.003
6. Добровольский В.В. // Рассеянные элементы в бореальных лесах. М.: Наука, 2004. С. 23. EDN: QKVTWB.
7. Соколов О.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. В 2 ч. Ч.1: Атлас распределения тяжёлых металлов в объектах окружающей среды / О.А. Соколов, В.А. Черников, С.В. Лукин. Белгород: Константа, 1999. 188 с. EDN: RDSUEH.
8. Никифорова Е.М. // Геохимическая экология и биогеохимическое изучение таксонов биосферы. М.: Наука, 2003. С. 108. EDN: QKEAVX.
9. Умаров М.М. // Тяжёлые металлы в окружающей среде: сб. науч. тр. М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 109.
10. Белюченко И.С. // Научный журнал КубГАУ, 2014. № 95(1). С. 1. EDN: RVEYHB.

11. Williams L., Salt D.E. // Curr. Opin. Plant Boil. 2009. V. 12, No. 3. P. 247. DOI: 10.1016/j.pbi.2009.05.009.
12. Бауммаков Д.И., Лукаткин А.С. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. 236 с. EDN: QCNYFZ.
13. Протасова Н.А. // Агрехимия. 2005. № 2. С. 80. EDN: HSANUL.
14. Битюцкий Н.П. Микроэлементы и растение: учебное пособие / Н.П. Битюцкий. СПб.: СПбГУ, 1999. 232 с. EDN: UXRBFX.
15. Феценко В.П. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 613.
16. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат. Лен. отд., 1987. 142 с. EDN: SGUQRR.
17. Прохорова Н.В. Распределение тяжелых металлов в посевах важнейших сельскохозяйственных культур в Самарской области: монография; Самар. гос. ун-т. Самара: Самар. ун-т, 2006. 141 с.: ил. EDN: QKYVFX.
18. Троц Н.М., Ишкова С.В., Батманов А.В., Ахматов Д.А. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 1. С. 249. EDN: PDBXED.
19. Ali G., Srivastava P.S., Iqbal M. // Biol. Plant. 2000. V. 43. P. 599. DOI: 10.1023/A:1002852016145
20. Khudsar T., Iqbal M., Sairam R.K. // Biol. Plant. 2004. V. 48, No. 2. P. 255. DOI: 10.1023/B:BIOP.0000033453.24705.f5.
21. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в агроландшафте. СПб.: ПИЯФ РАН, 2008. 216 с. EDN: QBSZFI.
22. Узakov З.З. // Символ науки. 2018. № 1-2. С. 52.
23. РД 52.18.191-89. Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. М.: Госкомгидромет, 1990.
24. ГОСТ 17.4.3.01-1983. Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2008. – 4 с.
25. Barbieri M. // Journal of Geology and Geophysics. 2016. N 5(01). P. 237. DOI: 10.4172/2381-8719.1000237.
26. Коновалова Э.Е. // Международный студенческий научный вестник. Геология. 2018. № 6. С. 113.
27. Payandeh K. // Journal of Health Sciences. 2018. No. 10. P. 1. DOI: 10.5812/ jjhs/14400.
28. Гиниятуллин Р.Х. // Лесное хозяйство. 2016. № 2. С. 74.
29. Афанасьева Л.В. // Химия растительного сырья. 2018. № 3. С. 123. EDN: VABOZI.

**Крупнова Татьяна Георгиевна** – кандидат химических наук, доцент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск). E-mail: [krupnovatg@susu.ru](mailto:krupnovatg@susu.ru)

**Ракова Ольга Викторовна** – кандидат химических наук, доцент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск). E-mail: [rakovaov@susu.ru](mailto:rakovaov@susu.ru)

**Попкова Марина Аркадьевна** – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск). E-mail: [popkovama@susu.ru](mailto:popkovama@susu.ru)

**Гаврилкина Светлана Викторовна** – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, (Миасс). E-mail: [gidro@ilmeny.ac.ru](mailto:gidro@ilmeny.ac.ru)

*Поступила в редакцию 16 марта 2023 г.*

## DISTRIBUTION OF SOME HEAVY METALS IN WINTER WHEAT AT DIFFERENT STAGES OF ITS DEVELOPMENT

T.G. Krupnova<sup>1</sup>, [krupnovatg@susu.ru](mailto:krupnovatg@susu.ru)

O.V. Rakova<sup>1</sup>, [rakovaov@susu.ru](mailto:rakovaov@susu.ru)

M.A. Popkova<sup>1</sup>, [popkovama@susu.ru](mailto:popkovama@susu.ru)

S.V. Gavrilkina<sup>2</sup>, [gidro@ilmeny.ac.ru](mailto:gidro@ilmeny.ac.ru)

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

<sup>2</sup> South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Miass, Russian Federation

In the modern world, with its rapid development of industry, environmental pollution by heavy metals is increasing on a scale uncharacteristic of nature. When heavy metals enter the soil in large quantities, they affect the biological and biochemical properties of soils, the change in the amount of mobile forms of nutrients in them. In polluted soils the absorption of heavy metals by plants leads to the accumulation of metals in edible parts of vegetables or crops. The total contamination of the soil is characterized by the gross content of heavy metals, and the availability of elements for plants is determined by their mobile forms. According to the calculation of the geoaccumulation index for the studied elements, the following series of metals have been compiled according to their contribution to soil pollution: Cu > Zn > Fe > Mn.

The quantitative measure of the accumulation intensity of chemical elements by plants from the soil is the accumulation coefficient, describing the degree of biofilicity of the elements, as well as intensity of their involvement in biological cycles. The accumulative abilities of roots and shoots in relation to zinc at different stages of wheat growth decrease in the following order: earing > ripening > tubing. However, for copper there is a gradual decrease in accumulation in the roots at different stages of wheat growth in the following order: earing > tubing > ripening; in shoots it is: ripening > tubing > earing. According to the results of the study, several series of metals have been worked out according to the ability of accumulation by winter wheat. The calculated value of the transition coefficient allows us to formulate the following conclusions: iron reaches the maximum value of the coefficient at the tubing stage (7.764) and has the greatest value among all elements and growth stages; zinc and manganese reach the maximum value of the coefficient at the earing stage (1.765 and 2.193, respectively); copper reaches it at the ripening stage (1.143).

*Keywords: heavy metals, environmental pollution, winter wheat*

*Received 16 March 2023*

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Распределение некоторых тяжелых металлов в озимой пшенице на разных стадиях её развития / Т.Г. Крупнова, О.В. Ракова, М.А. Попкова, С.В. Гаврилкина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2023. Т. 15, № 3. С. 148–158. DOI: 10.14529/chem230308

### FOR CITATION

Krupnova T.G., Rakova O.V., Popkova M.A., Gavrilkina S.V. Distribution of some heavy metals in winter wheat at different stages of its development. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry*. 2023;15(3):148–158. (In Russ.). DOI: 10.14529/chem230308