

DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-2-220-241

УДК 504.064

А.В. Синдирева¹, О.И. Елизаров¹, С.Г. Котченко²

¹ Тюменский государственный университет,
625003 г. Тюмень, Российская Федерация;

² Государственный центр агрохимической службы «Тюменский»,
625041 г. Тюмень, Российская Федерация

Геохимические особенности аккумуляции меди в почве и в яровой мягкой пшенице (*Triticum aestivum*) в условиях юга Тюменской области

В статье представлены данные о содержании меди в пахотном горизонте основных типов почв Тюменской области и в растениях, выращенных на данных почвах. Определены зависимости ее распределения с содержанием подвижных форм ряда макро- и микроэлементов в почвах, а также изучены взаимосвязи меди с химическими элементами при поступлении в растения. Для анализа геохимических особенностей распределения микроэлемента в почвенном покрове и растительности использовали полевые, лабораторные и статистические методы исследования. При обобщении и анализе материала использовались собственные исследования и материалы отчетов Государственного центра агрохимической службы «Тюменский» по обследованию пахотных почв Тюменской области. Во всех изученных типах почв юга Тюменской области превышения

предельно допустимых концентраций меди не отмечается. Установлена обратная связь между подвижными формами меди и гумусом, марганцем, свинцом. Для элементов цинк, кобальт, железо, сера, кадмий, никель, ртуть, мышьяк связь с подвижными формами меди не установлена. Изучено содержание меди в растениях яровой мягкой пшеницы *Triticum aestivum*, выращенной на изучаемых типах почв. Для юга Тюменской области (в пределах рассматриваемых реперных участков) наибольшее содержание микроэлемента отмечается в Тюменском районе (6,4 мг/кг), наименьшее – в Заводоуковском (3,83 мг/кг). Изучена взаимосвязь меди с макро- и микроэлементами при поступлении в растения. Установлена высокая положительная корреляция между содержанием меди и цинком, марганцем, кадмием, калием, кальцием. С элементами кобальт, свинец, мышьяк, азот, фосфор достоверная связь не установлена. Полученные данные могут быть использованы при экологическом мониторинге в качестве исходных, фоновых точек отчета при оценке степени загрязнения агроценозов, обеспеченности пахотных почв медью, а также при прогнозировании содержания и действия меди в системе почва–растение в условиях юга Тюменской области.

Ключевые слова: микроэлементы в почве, макроэлементы в почве, пахотные почвы Тюменской области, биогеохимические коэффициенты, медь, накопление меди в почве, накопление меди в растениях, Тюменская область, *Triticum aestivum*

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Тюменской области в рамках научного проекта № 20-45-720011.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Синдирева А.В., Елизаров О.И., Котченко С.Г. Геохимические особенности аккумуляции меди в почве и в яровой мягкой пшенице (*Triticum aestivum*) в условиях юга Тюменской области // Социально-экологические технологии. 2023. Т. 13. № 2. С. 220–241. DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-2-220-241

DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-2-220-241

A.V. Sindireva¹, O.I. Elizarov¹, S.G. Kotchenko²

¹ Tyumen State University,
Tyumen, 625003, Russian Federation

² “Tyumensky” State Center for Agrochemical Service,
Tyumen, 625041, Russian Federation

Geochemical features of copper accumulation in the soil and spring common wheat (*Triticum aestivum*) in the conditions of the South of Tyumen region

The article presents data on the content of copper in the plow horizon of the main types of soils in Tyumen region and in plants grown on these soils. The interrelations of its distribution with the content of mobile forms of a number of macro- and microelements in soils were determined, and the interrelations of copper with chemical elements when entering plants were studied. To analyze the geochemical features of the microelement distribution in the soil cover and vegetation, field, laboratory, and statistical research methods were used. When summarizing and analyzing the material, we used our own research and materials from the reports of the “Tyumensky” State Center for Agrochemical Service on the survey of arable soils in Tyumen region. In all the studied types of soils in the south of Tyumen region, the excess of the maximum permissible concentrations of copper is not observed. An inverse relationship has been established between mobile forms of copper and humus, manganese, and lead. For the elements zinc, cobalt, iron, sulfur, cadmium, nickel, mercury, arsenic, the connection with mobile forms of copper has not been established. The content of copper in plants of spring soft wheat *Triticum aestivum* grown on the studied soil types was studied. For the south of the Tyumen region (within the considered reference areas), the highest content of the trace element is noted in the Tyumensky district (6.4 mg/kg), the lowest in Zavodoukovsky (3.83 mg/kg). The interrelation

of copper with macro- and microelements upon entering plants was studied. A high positive correlation has been established between the content of copper and zinc, manganese, cadmium, potassium, and calcium. With cobalt, lead, arsenic, nitrogen, phosphorus, a reliable relationship has not been established. The data obtained can be used in environmental monitoring as initial, background reporting points in assessing the degree of pollution of agrocenoses, the availability of arable soils with copper, as well as in predicting the content and effect of copper in the soil-plant system in the South of Tyumen region.

Key words: trace elements in soils, arable soils in Tyumen region, biogeochemical coefficients, copper, accumulation of copper in the soil, accumulation of copper in plants, Tyumen region, *Triticum aestivum*

Acknowledgments. The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and Tyumen Region within the framework of the scientific project No. 20-45-720011

FOR CITATION: Sindireva A.V., Elizarov O.I., Kotchenko S.G. Geochemical features of copper accumulation in the soil and spring common wheat (*Triticum aestivum*) in the conditions of the South of Tyumen region. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2023. Vol. 13. No. 2. Pp. 220–241. (In Rus.) DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-2-220-241

Введение

Почвы и произрастающие на них растения испытывают на себе определенное негативное воздействие со стороны хозяйственной деятельности, проявляющееся в процессе избыточного накопления химических элементов. Однако опасен и недостаток микроэлементов в почве, что может быть связано с выносом потоками вещества в агроценозах, а также спецификой местных геохимических условий. Содержание микроэлементов в почвах зависит от условий почвообразования, минералогического и гранулометрического состава почвообразующих пород, наличия в почвах органического вещества, реакции среды и других факторов. Мелкие и слабогумусированные почвенные разности обычно обеднены микроэлементами по сравнению с разностями, богатыми илом и органическим веществом [Ильин, 1991; Сысо, 2007].

Недостаток ряда микроэлементов в агроэкосистемах характерен для многих территорий, в том числе для районов юга Тюменской области. Это объясняется целым набором факторов, в том числе эдафических. Данная особенность геохимических условий отмечена в работах

многих авторов. В исследованиях микроэлементного состава почв районов Тюменской области отмечается недостаточная обеспеченность многими важными для произрастания сельскохозяйственных растений элементами [Гаева, Захарова, Скипин, 2013; Особенности накопления тяжелых металлов..., 2018]. Однако Т.В. Котова отмечает тенденцию к накоплению тех или иных тяжелых металлов в сельскохозяйственных культурах, выращенных на различных типах почв юга Тюменской области [Котова, 2008]. Таким образом, подчеркивается важность определения содержания микроэлементов в различных типах почв, характеризующихся разнообразными физико-химическими показателями. Об актуальности изучения поведения тяжелых металлов в почвах указывают и зарубежные авторы, например, отмечены особенности распределения и аккумуляции тяжелых металлов в почвах для выяснения поведения микроэлементов в окружающей среде [Lisetskii et al., 2020].

К микроэлементам, играющим неоднозначную роль в почвах и растениях, относят медь. С одной стороны, избыточное ее накопление в пищевых цепях, в связи с техногенным поступлением, вызывает негативные последствия для живых организмов. С другой – отмечается недостаток меди в почвах и произрастающих на них растениях. Катионы меди обладают разнообразными свойствами, и в почвах и осадках характеризуются склонностью к химическому взаимодействию с минеральными и органическими компонентами. Ионы меди способны осаждаться такими анионами, как сульфид, карбонат и гидроксид. Таким образом, медь является относительно малоподвижным элементом в почвах, и ее суммарные содержания обнаруживают довольно слабые вариации в профилях почв [Шеуджен, 2003]. Малая подвижность меди обуславливает проявления ее недостатка для сельскохозяйственных растений. Следует отметить, что медь имеет большое значение для растений. Она входит в состав многих ферментов, при недостатке которых нарушаются такие физиологические процессы, как фотосинтез, дыхание, перераспределение углеводов и белков [Там же].

Медь оказывает влияние на проницаемость сосудов ксилемы для воды, контролирует образование ДНК и РНК, и ее дефицит значительно снижает развитие растений. Также медь влияет на механизмы, контролирующие устойчивость к заболеваниям. Для различных видов растений уровни концентраций, при которых наблюдается дефицит меди, сильно варьируют [Там же]. В связи с этим представляет особый теоретический и практический интерес изучение содержания меди в конкретных агроэкологических условиях и выявление факторов, влияющих на ее подвижность и распределение в почвах.

Цель данного исследования – установить взаимосвязь содержания меди с определенными химическими показателями почв и растений, способными повлиять на ее аккумуляцию в системе «почва – растение», в условиях юга Тюменской области.

Объекты исследования – почвы и растения территории юга Тюменской области (пахотных горизонт различных типов почв, а также растения яровой мягкой пшеницы, выращенной на данных почвах).

Материалы и методы

Северное Зауралье, на территории которого расположена основная часть Тюменской области, представляет собой составную часть обширной Западно-Сибирской равнины. Исследования проводились на территории юга Тюменской области с 2020 по 2022 гг.

При обобщении и анализе материала использовались собственные исследования и материалы отчетов Государственного центра агрохимической службы «Тюменский» по обследованию пахотных почв Тюменской области. Карта-схема участков отбора проб почвенных образцов в районах юга Тюменской области представлена на рис. 1.

Объектом исследования являлись почвы и растения юга Тюменской области. Основные исследуемые типы и подтипы почв: глинистые аллювиальные луговые (Исетский район), среднесуглинистые черноземы выщелоченные (Заводоуковский район), среднесуглинистые серые лесные – темно-серые лесные (Омутинский, Упоровский, Тюменский районы), среднесуглинистые лугово-глееватые (Тобольский район), среднесуглинистые серые лесные (Нижнетавдинский район), среднесуглинистые серые лесные – светло-серые лесные (Ярковский район), среднесуглинистые аллювиальные дерновые (Тюменский и Тобольский районы). Выбор места для отбора почвенных образцов производился с учетом рельефа местности, экспозиции, растительного покрова. Всего обследовано 10 реперных участков, $n = 75$.

Образцы почв отбирали методом конверта в различных районах юга Тюменской области, после чего составлялась усредненная проба. Отбор почвенных и растительных образцов и пробоподготовка их для химического анализа осуществлялся в соответствии с требованиями агрохимических методов. Для анализа геохимических особенностей распределения меди и выявления факторов, влияющих на аккумуляцию элемента, использовали материалы отчетов Государственного центра агрохимической службы «Тюменский» и собственные данные. При этом оценивали данные о содержании гумуса, кислотности, содержание макро- и микроэлементов в пахотном горизонте (0–20 см) в почвах и растениях

реперных участков. Содержание меди определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

В рамках исследования проведена оценка взаимосвязи содержания в почве подвижных форм меди и ряда химических элементов: цинка, кобальта, марганца, железа, серы, кадмия, свинца, никеля, ртути, мышьяка. Также оценивалась взаимосвязь меди и химических элементов при поступлении в растения, выращенные на исследуемых типах почв.

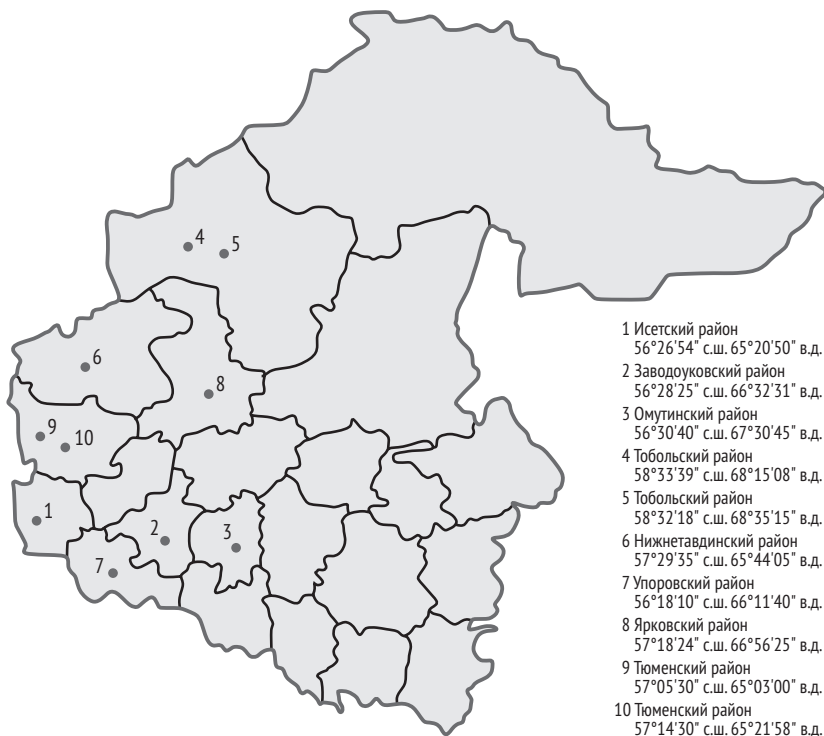


Рис. 1. Карта-схема точек отбора проб почвенных образцов в районах юга Тюменской области

Fig. 1. Map-scheme of sampling points for soil samples in the areas of the south of Tyumen region

Рассчитаны биогеохимические коэффициенты накопления меди в растениях (коэффициенты биологического поглощения, биогеохимической подвижности).

В работе использовали методы дисперсионного, регрессионного и корреляционного анализов [Доспехов, 1985]. Математическая обработка результатов осуществлялась стандартными статистическими методами с использованием компьютерного пакета программ Excel.

Результаты и обсуждение

Рассмотрены основные типы почв юга Тюменской области, расположенных в южно-таежной лесной и лесостепной зонах. В пределах рассматриваемой территории выделяется несколько основных типов почв: аллювиальные, чернозем, серая лесная, луговая. Превышений ПДК на исследуемых почвах в пределах реперных участках для подвижных форм тяжелых металлов не отмечается (табл. 1).

Таблица 1

Содержание подвижных форм химических элементов в почвах юга Тюменской области (по данным Государственного центра агрохимической службы «Тюменский»)
[The content of mobile forms of chemical elements in the soils of the South of Tyumen region (according to the "Tyumensky" State Center for Agrochemical Service)]

Элемент [Element]	Среднее значение, мг/кг [Average value, mg/kg]	ПДК для подвижных форм, мг/кг* [MPC for mobile forms, mg/kg*]	Лимит, мг/кг [Limit, mg/kg]
Zn	1	23,0	0,61–1,39
Co	0,155	5,0	0,12–0,19
Mn	26,82	–	9,52–44,12
Fe	113,5	–	2,0–225,0
S	27,7	–	3,4–24,3
Cd	0,062	–	0,018–0,044
Pb	1,58	–	0,68–2,47
Ni	1,67	4,0	0,52–1,15
Hg	0,062	–	0,018–0,044
As	5,85	–	4–7,7

* Предельно допустимые концентрации химических веществ в почвах и допустимые уровни их содержания по показателям вредности (Госкомприрода СССР, № 02-2333 от 10.12.1990). [Maximum permissible concentrations of chemicals in soils and permissible levels of their content according to hazard indicators (Goskompriroda USSR, No. 02-2333 dated 12/10/1990).]

На содержание меди, в т.ч. и в условиях юга Тюменской области, влияют те же факторы, что и на другие химические элементы. Почвы в основном наследуют уровень содержания меди от почвообразующих пород. В то же время на аккумуляцию микроэлементов и на их подвижность влияет сочетание агрохимических показателей для определенного типа почв [Особенности накопления тяжелых металлов..., 2018]. В работе рассмотрены подвижные формы элементов в почве, поскольку данные формы являются доступными для усваивания растениями и активно мигрируют в пищевой цепи.

В табл. 2 представлены данные о среднем содержании меди в пахотном горизонте изученных типов и подтипов почв юга Тюменской области.

Таблица 2

**Среднее содержание подвижной формы меди
в пахотном горизонте почв юга Тюменской области
[The average content of the mobile form of copper
in the plow horizon of soils in the South of Tyumen region]**

Район [Area]	Тип, подтип почвы [Soil type, subtype]	Содержание меди, мг/кг [Copper content, mg/kg] $\bar{X} \pm S_d$
Исетский [Isetskiy]	Аллювиальная луговая [Alluvial meadow]	0,16 ± 0,03
Заводоуковский [Zavodoukovskiy]	Чернозем выщелоченный [Leached chernozem]	0,15 ± 0,02
Тобольский [Tobolskiy]	Луговая глееватая [Meadow gleyic]	0,19 ± 0,05
Омутинский, Упоровский, Тюменский [Omutinsky, Uporovsky, Tyumensky]	Серая лесная – темно-серая [Forest gray – Forest gray]	0,22 ± 0,05
Нижнетавдинский [Nizhnetavdinskiy]	Серая лесная – серая лесная [Forest gray – Forest gray]	0,20 ± 0,05
Ярковский [Yarkovsky]	Серая лесная – светло-серая [Forest gray – light gray]	0,21 ± 0,05
Тюменский [Tyumensky]	Аллювиальная дерновая [Alluvial turf]	0,20 ± 0,02
Тобольский [Tobolskiy]		0,25 ± 0,05
ПДК* [MPC*]		3,0

* Предельно допустимые концентрации химических веществ в почвах и допустимые уровни их содержания по показателям вредности (Госкомприрода СССР, № 02-2333 от 10.12.1990). [Maximum permissible concentrations of chemicals in soils and permissible levels of their content according to hazard indicators (Goskompriroda USSR, No. 02-2333 dated 12/10/1990).]

Содержание подвижных форм меди в различных типах почв варьирует незначительно – от 0,16 до 0,25 мг/кг и не превышает установленных ПДК (см. табл. 2). Наибольшее содержание подвижной меди отмечается в аллювиальной дерновой почве и составляет 0,25 мг/кг. В целом по обеспеченности почв подвижной медью исследуемые почвы можно классифицировать как среднеобеспеченные [Ильин, 1991].

Для выявления факторов, влияющих на концентрацию меди в верхнем слое 0–20 см почв, проведен корреляционный анализ содержания подвижных форм меди и других элементов (табл. 3).

Таблица 3

Взаимосвязь содержания подвижной меди в почвах юга Тюменской области с химическими показателями
[Relationship between the content of mobile copper in the soils of the South of Tyumen region and chemical characteristics]

Уравнение регрессии [Regression equation]	Характер взаимодействия [The nature of the interaction]
$Cu = 0,04Zn + 0,238, r = 0,35$	Антагонизм [Antagonism]
$Cu = -43,9Co^2 + 13,4Co - 0,79, \eta = 0,47$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]
$Cu = -0,0015Mn + 0,23, r = 0,52$	Антагонизм [Antagonism]
$Cu = 0,0002Fe + 0,19, r = 0,35$	Синергизм [Synergism]
$Cu = -0,0002S^2 + 0,0054S + 0,17, \eta = 0,06$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = -182,75Cd^2 + 9,6138Cd + 0,0871, \eta = 0,32$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]
$Cu = -0,0718Pb^2 + 0,2342Pb + 0,0451, \eta = 0,51$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]
$Cu = -0,2629Ni^2 + 0,4275Ni + 0,0375, \eta = 0,12$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = -175,95Hg^2 + 9,9043Hg + 0,0784, \eta = 0,25$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = 0,0055As + 0,1711, r = 0,24$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = 0,0088pH + 0,1562, r = 0,14$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = -0,0071 * C_{орг} + 0,2393, r = 0,5$	Антагонизм [Antagonism]

Изучение взаимосвязи микро- и макроэлементов в почве имеет практическое значение, поскольку дополнительное антропогенное поступление химических элементов в почву агроценозов, в частности, в результате применения минеральных удобрений, может изменить сложившийся баланс микроэлементов в почве и способствовать как увеличению, так и снижению их доступности для растений [Шеуджен, 2003].

В ходе исследования выявлена средняя корреляционная связь между подвижными формами в парах Cu–Mn, Cu–C_{орг} (содержание гумуса), имеющая отрицательные значения. Зависимость между подвижностью меди и марганца отмечается и в литературных данных [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989]. Авторы отмечают, что адсорбированная медь связана с оксидами Mn (минералы гематит, гетит, бернессит). Адсорбция характерна для поверхностного слоя среды, которым в нашем исследовании является почвенный горизонт 0–20 см.

На основании установленной связи меди и гумуса можно предположить, что на подвижность ионов меди в определенной степени влияет наличие органического вещества в почве. Антагонистический характер данной связи отмечается многими авторами [Bloom, McBride, 1979; Bloomfield, 1981]. Органическое вещество (например, торф или гуминовые кислоты) способны фиксировать ионы Cu путем образования прямых координационных связей с кислородом функциональных групп.

Проявление синергизма–антагонизма выражается в преобладании синергетических связей до определенного содержания элементов. Достигая данной концентрации, характер связей все больше проявляется в виде антагонизма. Данное явление отмечается между Cu и Co, S, Cd, Pb.

Несмотря на то, что ряд авторов отмечает увеличение мобильности тяжелых металлов при повышении кислотности, нашими исследованиями в среднем по изученным типам почв такой зависимости не установлено ($r = 0,14$). Однако данная зависимость может проявиться при изучении пары Cu–pH в пределах определенного типа почвы.

Более подробно рассмотрены корреляционные связи между элементами в серых лесных почвах, являющихся характерными в природных зонах подтайги и лесостепи (табл. 4).

Согласно полученным уравнениям регрессии, для серых лесных почв характерны более высокие корреляционные связи со многими показателями. В частности, отмечаются связи со свинцом, марганцем, цинком, железом, кадмием, никелем, ртутью. Коэффициент корреляции содержания меди и органического вещества в серых лесных почвах ниже по сравнению с остальными типами почв юга Тюменской области

($\eta = 0,48$). Также регрессионный анализ серых лесных почв подтверждает литературные данные о влиянии кислотности на подвижность ионов меди. Корреляционная связь здесь наиболее высокая ($r = 0,99$). Таким образом, высокая степень связи в серых лесных почвах юга Тюменской области отмечена между подвижными формами меди и цинком, свинцом, марганцем, железом, кадмием, никелем, ртутью.

Таблица 4

**Взаимосвязь содержания подвижных форм меди
в серых лесных почвах юга Тюменской области
с химическими показателями**
[Relationship between the content of mobile forms of copper
in gray forest soils in the South of the Tyumen region
and chemical parameters]

Уравнение регрессии [Regression equation]	Характер взаимодействия [The nature of the interaction]
$Cu = -0,23Zn^2 + 0,42Zn + 0,039, \eta = 0,62$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]
$Cu = 16,7Co^2 - 4,83Co + 0,56, \eta = 0,10$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = 0,0017Mn + 0,18, r = 0,72$	Синергизм [Synergism]
$Cu = -0,0004Fe + 0,23, r = 0,8$	Антагонизм [Antagonism]
$Cu = -0,008S^2 + 0,09S - 0,0332, \eta = 0,58$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]
$Cu = 1,61Cd + 0,17, r = 0,79$	Синергизм [Synergism]
$Cu = -0,029Pb^2 + 0,09Pb + 0,16, \eta = 0,56$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]
$Cu = -1,63Ni^2 + 2,17Ni - 0,49, \eta = 0,62$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]
$Cu = -624,17Hg^2 + 31,19Hg - 0,16, \eta = 0,97$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]
$Cu = 0,0005As + 0,21, r = 0,06$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = 0,02pH + 0,08, r = 0,99$	Синергизм [Synergism]
$Cu = -0,007C_{орг}^2 + 0,07xC_{орг} + 0,03C_{орг}, \eta = 0,48$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]

Содержание в почве подвижных форм тяжелых металлов является важным показателем, характеризующим санитарно-гигиеническую обстановку территории и показывающим доступность элементов для растений. Поэтому определено содержание химических элементов в пшенице, выращенной на изучаемых типах почв, для оценки степени накопления данных элементов, а также корреляционные связи между ними. Для юга Тюменской области (в пределах рассматриваемых реперных участков) наибольшее содержание меди в пшенице отмечается в Тюменском районе (6,4 мг/кг), наименьшее – в Заводоуковском (3,83 мг/кг) (табл. 5).

Таблица 5

**Содержание меди в яровой мягкой пшенице,
произрастающей в районах юга Тюменской области
(мг/кг продукции на воздушно-сухое состояние)
[The content of copper in spring soft wheat growing
in the regions of the South of Tyumen region
(mg/kg of production on an air-dry state)]**

Район [Area]	Содержание меди, мг/кг [Copper content, mg/kg]
Исетский [Isetskiy]	3,99
Заводоуковский [Zavodoukovskiy]	3,83
Омутинский [Omutinsky]	4,10
Тобольский [Tobolskiy]	5,60
Нижнетавдинский [Nizhnetavdinsky]	4,66
Упоровский [Uporovsky]	4,40
Ярковский [Yarkovsky]	4,64
Тюменский [Tyumensky]	6,40

Для меди рассчитаны биогеохимические коэффициенты (коэффициент биологического поглощения, коэффициент биогеохимической подвижности), показывающие степень накопления данного микроэлемента в сухом веществе растений относительно его содержания в различных типах почв района исследования (табл. 6).

Коэффициент биологического поглощения: $A_x = L_x/n_x$, где L_x – содержание элемента в золе растения; n_x – среднее содержание (кларк) меди в земной коре – 47 мг/кг [Виноградов, 1962].

Таблица 6

Значения биогеохимических коэффициентов меди для растений, выращенных на различных типах почв
[Values of copper biogeochemical coefficients for plants grown on different soil types]

Район [Area]	Тип, подтип почв [Soil type, subtype]	Коэффициент биологического поглощения [Biological absorption coefficient]	Коэффициент биогеохимической подвижности [Biogeochemical mobility coefficient]
Исетский [Isetskiy]	Аллювиальная луговая [Alluvial meadow]	0,085	24,90
Заводоуковский [Zavodoukovskiy]	Чернозем выщелоченный [Leached chernozem]	0,081	25,50
Тобольский [Tobolskiy]	Луговая глееватая [Meadow gleyic]	0,120	29,50
Нижнетавдинский [Nizhnetavdinsky]	Серая лесная – серая лесная [Forest gray – Forest gray]	0,100	23,30
Омутинский [Omutinsky]	Серая лесная – темно-серая [Forest gray – dark gray]	0,090	18,60
Упоровский [Упоровский]	Серая лесная – темно-серая [Forest gray – dark gray]	0,090	20,00
Тюменский [Tyumensky]	Серая лесная – темно-серая [Forest gray – dark gray]	0,100	21,20
Ярковский [Yarkovsky]	Серая лесная – светло-серая [Forest gray – light gray]	0,100	22,10
Тюменский [Tyumensky]	Аллювиальная дерновая [Alluvial turf]	0,140	32,00
Тобольский [Tobolskiy]	Аллювиальная дерновая [Alluvial turf]	0,100	19,96

Коэффициент биогеохимической подвижности: $B_x = a_x/m_x$, где a_x – содержание элемента в сухом веществе растений; m_x – содержание подвижных форм элемента в почве.

Расчет биогеохимических коэффициентов показал тенденцию к различному накоплению меди в пшенице, произрастающей на разных почвах юга Тюменской области. В Тюменском районе на аллювиальных дерновых почвах и Тобольском районе на лугово-глееватых почвах наблюдается тенденция увеличения биогеохимической подвижности меди (B_x – 32 и 29,5 соответственно). Значения коэффициентов снижаются в черноземных, аллювиальных луговых и серых лесных почвах. Коэффициент биологического поглощения в рассмотренных типах почв имеет низкие значения (содержание элемента в растениях значительно ниже кларка в земной коре) и варьирует незначительно.

Рассмотрена связь между химическими элементами, поступающими в пшеницу на изучаемых типах почв, а также выявлен тип взаимоотношений микро- и макроэлементов (табл. 7).

Таблица 7

**Взаимосвязь валового содержания меди
с химическими элементами при поступлении их в пшеницу**
**[The relationship of the total content of copper
with chemical elements when they enter wheat]**

Уравнение регрессии [Regression equation]	Характер взаимодействия [The nature of the interaction]
$Cu = 0,05Zn + 3,33, r = 0,63$	Синергизм [Synergism]
$Cu = -187,97Co^2 + 40,99Co + 2,84, \eta = 0,12$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = 0,0071Mn + 4,18, r = 0,60$	Синергизм [Synergism]
$Cu = 3,04Cd + 4,31, r = 0,61$	Синергизм [Synergism]
$Cu = 17,53Pb^2 - 12,93Pb + 7,09, \eta = 0,001$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = 12,08As + 4,013, \eta = 0,52$	Синергизм [Synergism]
$Cu = -1,68N^2 + 5,33N + 0,73, \eta = 0,16$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = -13,051P^2 + 10,31P + 3,03, \eta = 0,04$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = 1,64K + 3,42, r = 0,66$	Синергизм [Synergism]
$Cu = 0,96Ca + 4,09, r = 0,71$	Синергизм [Synergism]

Прямые корреляционные связи прослеживаются между концентрацией меди с микроэлементами: цинк ($r = 0,63$), марганец ($r = 0,60$), кадмий ($r = 0,61$), а также макроэлементами: калий ($r = 0,66$), кальций ($r = 0,71$). С такими элементами, как кобальт, свинец, мышьяк, азот, фосфор достоверность связи не установлена.

Взаимодействие Cu и Zn отмечено в работах [Ринькис, 1972; Graham, 1981] и проявляется антагонизмом данных микроэлементов. Каждый из них вследствие взаимной конкуренции способен ингибировать поглощение другого корневой системой растения. Однако в рамках нашего исследования между данными элементами проявляется синергизм.

Взаимодействие Cu–Cd также подтверждается литературными данными [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989] и проявляется как в форме антагонизма, так и синергизма. В нашем исследовании прослеживается синергизм, который может быть вторичным эффектом повреждения мембран, вызванного несбалансированным соотношением данных элементов.

О корреляции Cu–Mn в процессе потребления их растениями есть сведения как о антагонизме, так и синергизме данных микроэлементов. В ходе нашего исследования в пшенице установлен синергизм как тип взаимоотношений.

Один из важных взаимодействий макро- и микроэлементов проявляется между Cu и N, т.к. именно Cu образует прочные комплексы с протеинами. Как отмечается, у растений с высокими уровнями содержания азота вследствие быстрого роста проявляются симптомы дефицита Cu [Там же]. Однако в результате нашего исследования не выявлено достоверной связи между данными элементами в пшенице, выращенной на почвах юга Тюменской области.

Антагонизм Cu и P, выявленный нами, отмечают и другие авторы [Лакин, 1990; Shen, Xiang, Zhang, 2020]. Фосфаты обладают большой способностью к адсорбции Cu. Избыток меди, напротив, ингибирует активность фосфатазы, вследствие чего уменьшается доступность P для растений.

Для пары Cu–Ca отмечается синергетические взаимодействия, однако могут меняться на противоположные в зависимости от pH среды. Наиболее часто их антагонизм применяется для восстановления насыщенных медью почв с помощью известкования.

Для растений, выращенных на серых лесных почвах юга Тюменской области, также были рассмотрены корреляционные связи между валовыми формами меди и микроэлементами. Уравнения регрессии и тип взаимоотношений между микроэлементами в пределах серых лесных почв представлены в табл. 8.

**Взаимоотношения между макро- и микроэлементами
при поступлении их в растения, произрастающие
на серых лесных почвах**
[The relationship between macro- and microelements
when they enter plants growing on gray forest soils]

Уравнение регрессии [Regression equation]	Характер взаимодействия [The nature of the interaction]
$Cu = -0,02Zn + 5,12, r = 0,44$	Антагонизм [Antagonism]
$Cu = 3,97Co + 4,25, r = 0,26$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = -0,0014Mn^2 + 0,13Mn + 2,44, \eta = 0,9$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]
$Cu = -369,01Cd^2 + 113,61Cd + 0,07, \eta = 0,86$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]
$Cu = 0,17Pb + 4,43, r = 0,03$	Нет взаимосвязи [No relationship]
$Cu = 668,03As^2 - 74,36As + 5,99, \eta^2 = 0,58$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]
$Cu = -0,46N + 5,24, \eta = 0,76$	Антагонизм [Antagonism]
$Cu = 33,88P^2 - 26,78P + 9,015, \eta = 0,86$	Синергизм–антагонизм [Synergism–antagonism]
$Cu = 0,79K + 3,99, r = 0,59$	Синергизм [Synergism]
$Cu = 0,19Ca + 4,42, r = 0,40$	Синергизм [Synergism]

В пределах серых лесных почв подтверждается высокая корреляционная связь меди с такими элементами, как марганец, кадмий, азот, фосфор. Для пшеницы, выращенной на серых лесных почвах, отмечается лишь несколько элементов, с которыми медь имеет высокую положительную корреляцию.

Выводы

В результате исследования представлены данные о содержании меди в пахотном горизонте основных типов почв Тюменской области, а также в сельскохозяйственной продукции, выращенной на данных почвах. Определены взаимосвязи ее распределения с основными микроэлементами.

Содержание подвижных форм меди в зависимости от типа и подтипа почв изменяется в диапазоне от 0,15 до 0,25 мг/кг.

Содержание меди в пшенице, произрастающей на юге Тюменской области, варьирует от 3,83 до 6,4 мг/кг.

Биогеохимические коэффициенты показывают наибольшую тенденцию к накоплению меди в растениях, произрастающих на аллювиальных дерновых почвах в Тюменском районе и на лугово-глееватых почвах в Тобольском районе. В меньшей степени медь накапливается в растениях, произрастающих на серых лесных почвах в Омутинском районе и аллювиальных дерновых почвах в Тобольском районе.

Отмеченные взаимосвязи между химическими элементами не всегда подтверждаются литературными данными, что может быть связано со спецификой местных геохимических условий почвенно-растительной среды, особенностями накопления и миграции элементов. Для точного установления причин данных зависимостей следует учитывать также гранулометрический состав почв, расположение в рельефе точек отбора, а также период отбора образцов. Полученные данные рекомендуется включать в регулярный мониторинг геохимического состояния природной среды в пределах рассматриваемых участков для установления динамики содержания макро- и микроэлементов, параметров среды, а также характера взаимосвязей между ними.

Библиографический список / References

Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571. [Vinogradov A.P. Average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust. *Geokhimiya*. 1962. No. 7. Pp. 555–571. (In Rus.)]

Гаева Е.В., Захарова Е.В., Скипин Л.Н. Биогеохимия элементов в системе почва–растение–животное в условиях юга Тюменской области // Вестник КрасГАУ. 2013. № 11. С. 149–153. [Gayevaya E.V., Zakharova E.V., Skipin L.N. Biogeochemistry of elements in the soil–plant–animal system in the conditions of the South of the Tyumen region. *Bulletin of KrasSAU*. 2013. No. 11. Pp. 149–153. (In Rus.)]

Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование Тюменской области. М., 1973. [Gvozdetzkiy N.A. Fiziko-geograficheskoye rayonirovaniye Tyumenskoj oblasti [Physico-geographical zoning of the Tyumen region]. Moscow, 1973.]

Груздков Д.Ю., Трифонова Т.А., Ширкин Л.А. Оценка миграции тяжелых металлов в почвах // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2009. № 4. С. 40–45. [Gruzdkov D.YU., Trifonova T.A., Shirkin L. Assessment of migration of heavy metals in soils. *Lomonosov Soil Science Journal*. 2009. No. 4. Pp. 40–45. (In Rus.)]

Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. 5-е изд. М., 1985. [Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta [Field experiment methodology]. Moscow, 1985.]

Зырин Н.Г., Чеботарева Н.А. К вопросу о формах соединений меди, цинка, свинца в почвах и доступности для растений // Содержание и формы соединений микроэлементов в почвах. М., 1979. С. 324–350. [Zyirin N.G., Chebotareva N.A. On the issue of forms of copper, zinc, lead compounds in soils and availability for plants. *Soderzhaniye i formy soyedineniy mikroelementov v pochvakh*. Moscow, 1979. Pp. 324–350. (In Rus.)]

Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение // Почвоведение. Деградация, восстановление и охрана почв. 2007. № 9. С. 1112–1119. [Ilin V.B. Heavy metals in the soil–plant system. *Pochvovedeniye. Degradatsiya, vosstanovleniye i ohrana pochv*. 2007. No. 9. Pp. 1112–1119. (In Rus.)]

Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. М., 1991. [Ilin V.B. Tyazhelye metally v sisteme pochva–rasteniye [Heavy metals in the soil–plant system]. Novosibirsk, 1991.]

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / Пер. с англ. М., 1989. [Kabata-Pendias A., Pendias H. Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh [Trace elements in soils and plants]. Moscow, 1989.]

Каримов Х.Н., Узакон З.З., Хушмуродов Ж.П. Исследование антропогенного загрязнения орошаемых лугово-сероземных почв тяжелыми металлами // Наука и мир. 2019. № 11-1 (75). С. 20–23. [Karimov Kh.N, Uzakov Z.Z., Khushmurodov Zh.P. Study of anthropogenic pollution of irrigated meadow-gray soils with heavy metals. *Nauka i mir*. 2019. No. 11-1 (75). Pp. 20–23. (In Rus.)]

Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М., 1985. [Kovda V.A. Biogeokhimiya pochvennogo pokrova [Biogeochemistry of soil cover]. Moscow, 1985.]

Котова Т.В. Содержание тяжелых металлов в зерновых культурах в зависимости от типа почв // Вестник КрасГАУ. 2008. № 6. С. 46–48. [Kotova T.V. Content of heavy metals in grain crops depending on soil type. *Bulletin of KrasSAU*. 2008. No. 6. Pp. 46–48. (In Rus.)]

Лакин Г.Ф. Биометрия. 4-е изд., перераб и доп. М., 1990. [Lakin G.F. Biometriya [Biometrics]. Moscow, 1990.]

Методические рекомендации по определению нормативов соотношений макро- и микроэлементов в растениях по системе ИСОД. М., 1989. [Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu normativov sootnosheniy makro- i mikroelementov v rasteniyakh po sisteme ISOD [Methodological recommendations for determining the standards for the ratio of macro- and microelements in plants according to the ISOD system]. Moscow, 1989.]

Особенности накопления тяжелых металлов в почвах северной лесостепи районов Тюменской области / Гаева Е.В., Захарова Е.В., Котченко С.Г. и др. // Вестник КрасГАУ. 2018. № 5. С. 252–257. [Gayevaya E.V., Zakharova E.V., Kotchenko S.G. et al. Features of the accumulation of heavy metals in the soils of the northern forest-steppe areas of the Tyumen region. *Bulletin of KrasSAU*. 2018. No. 5. Pp. 252–257. (In Rus.)]

Особенности поведения тяжелых металлов в почвах / Роева Н.Н., Воронич С.С., Зайцева И.А. и др. // Экологические системы и приборы. 2021. № 7. С. 17–24. [Royeva N.N., Voronich S.S., Zaytseva I.A. et al. Features of the behavior of heavy metals in soils. *Ekologicheskiye sistemy i pribory*. 2021. No. 7. Pp. 17–24. (In Rus.)]

Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М., 1983. [Perelman A.I. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, 1983.]

Пинский Д.Л., Минкина Т.М. К вопросу о механизмах трансформации и аккумуляции тяжелых металлов в почвах // Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы. М., 2019. С. 538–541. [Pinskiy D.L., Minkina T.M. On the issue of mechanisms of transformation and accumulation of heavy metals in soils. *Fundamentalnyye kontseptsii fiziki pochv: razvitiye, sovremennyye prilozheniya i perspektivy*. Moscow, 2019. Pp. 538–541. (In Rus.)]

Распределение тяжелых металлов в агрегатах почв различных типов / Быстрова О.Н., Гулевская В.В., Мартынкина Е.А. и др. // Доклады Академии наук. 2008. Т. 40. № 3. С. 346–350. [Bystrova O.N., Gulevskaya V.V., Martynkina Ye.A. et al. Distribution of heavy metals in soil aggregates of various types. *Doklady Akademii nauk*. 2008. Vol. 40. No. 3. Pp. 346–350. (In Rus.)]

Ринькис Г.Я. Оптимизация минерального питания растений. Рига, 1972. [Rinkis G.Ya. *Optimizatsiya mineralnogo pitaniya rasteniy* [Optimization of mineral nutrition of plants]. Riga, 1972.]

Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск, 2007. [Syso A.I. *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoi Sibiri* [Patterns of the distribution of chemical elements in soil-forming rocks and soils of Western Siberia]. Novosibirsk, 2007.]

Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 5. Экотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами. Пушино, 2001. [Chernykh N.A., Milashchenko N.Z., Ladonin V.F. *Ekologicheskaya bezopasnost i ustoychivoye razvitiye* [Environmental safety and sustainable development]. Vol. 5. Ecotoxicological aspects of soil pollution with heavy metals. Pushchino, 2001.]

Шеуджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп, 2003. [Sheudzhen A.Kh. *Biogeokhimiya* [Biogeochemistry]. Maykop, 2003.]

Bloom P.R., McBride M.B. Metal ion binding and exchange with hydrogen ions in acid-washed peat. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1979. No. 43. P. 687.

Bloomfield C. The translocation of metals in soils. *The Chemistry of Soil Processes*. D.J. Greenland, M.H.B. Hayes (eds.). New York, 1981. Pp. 463–504.

González Henao S., Ghneim-Herrera T. Heavy metals in soils and the remediation potential of bacteria associated with the plant microbiome. *Frontiers in Environmental Science*. 2021. P. 604216.

Graham R.D. Absorption of copper by plant roots. *Copper in Soils and Plants*. J.F. Loneragan, A.D. Graham (eds.). New York, 1981. Pp. 141–163.

Lisetskii F.N., Marinina O.A., Poletaev A.O., Zelenskaya E.Ya. Comparative evaluation of pollution by heavy metals of ploughed and fallow land at various duration of agropedogenesis. *Journal of Agriculture and Environment*. 2020. No. 3 (15). Pp. 7–12.

Liu Z., Lu B., Xiao H. et al. Effect of mixed solutions of heavy metal eluents on soil fertility and microorganisms. *Environmental Pollution*. 2019. No. 254. P. 112968.

Shen Q., Xiang J., Zhang M. Distribution and chemical speciation of heavy metals in various size fractions of aggregates from zonal soils. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2020. Vol. 102 (16). Pp. 1–16. DOI: 10.1080/03067319.2020.1781840

Tyler G. Heavy metal pollution phosphatase activity and mineralization of organic phosphorus in forest soil. *Soil Biol. Biochem*. 1976. No. 8. P. 327.

Wang P., Liu J., Bi X. et al. Apportionment of sources of heavy metals to agricultural soils using isotope fingerprints and multivariate statistical analyses. *Environ Pollut*. 2019. Vol. 249. Pp. 208–216. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.034

Статья поступила в редакцию 10.01.2023, принята к публикации 19.02.2023
The article was received on 10.01.2023, accepted for publication 19.02.2023

Сведения об авторах / About the authors

Синдирева Анна Владимировна – доктор биологических наук; заведующая кафедрой геоэкологии и природопользования Института наук о Земле, Тюменский государственный университет

Anna V. Sindireva – Dr. Hab. in Biology; Head at the Department of Ecology and Nature Management of the Institute of Geosciences, Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8596-7584>

E-mail: sindireva72@mail.ru

Елизаров Олег Игоревич – аспирант кафедры геоэкологии и природопользования Института наук о Земле, Тюменский государственный университет

Oleg I. Elizarov – postgraduate student at the Department of Ecology and Nature Management of the Institute of Geosciences, Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation

E-mail: elizarovoleg@yandex.ru

Котченко Сергей Григорьевич – директор, Государственный центр агрохимической службы «Тюменский», г. Тюмень

Sergey G. Kotchenko – Director, “Tyumensky” State Center for Agrochemical Service, Tyumen, Russian Federation

E-mail: agrohim_72_1@mail.ru

Заявленный вклад авторов

А.В. Синдирева – анализ и обобщение материалов исследования, сравнения полученных результатов с литературными данными, подготовка текста статьи

О.И. Елизаров – проведение статистического анализа данных, подготовка текста статьи

С.Г. Котченко – подготовка материалов исследования, предоставление материала по фактическому содержанию химических элементов в почве и растениях

Contribution of the authors

A.V. Sindireva – analysis and generalization of research materials, comparison of the results obtained with literary data, preparation of the text of the article

O.I. Elizarov – conducting statistical data analysis, preparing the text of the article

S.G. Kotchenko – preparation of research materials, provision of material on the actual content of chemical elements in soil and plants

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
All authors have read and approved the final manuscript