

# ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ / ECOLOGY & NATURE MANAGEMENT

УДК 631.95

AGRIS P33

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/22-1/09>

*Синдирева А.В., Котченко С.Г., Елизаров О.И.*

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МЕДИ В ПОЧВЕННОМ ПОКРОВЕ НА ЮГЕ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

*Sindireva A.V., Kotchenko S.G., Elizarov O.I.*

### ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF THE COPPER CONTENT IN THE SOIL COVER IN THE SOUTH OF THE TYUMEN REGION

**Аннотация** В статье представлены данные о содержании меди в пахотном горизонте основных типов почв Тюменской области, используемых в сельскохозяйственном производстве, и определены взаимосвязи её распределения с основными физико-химическими показателями почв (содержанием гумуса, pH, макроэлементами). Для анализа геохимических особенностей распределения микроэлемента в почвенном покрове использовали полевые, лабораторные и статистические методы исследования. При обобщении и анализе материала использовались собственные исследования и материалы отчетов ФГБУ ГСАС «Тюменская» по обследованию пахотных почв Тюменской области. Во всех изученных типах почв юга Тюменской области превышения допустимых концентраций меди не отмечается. Содержание подвижных форм меди в зависимости от типа и подтипа почв изменяется в диапазоне от 0,15 до 0,25 мг/кг, валовое содержание колеблется от 10 до 18 мг/кг. Соотношение подвижной формы от валового содержания составляет от 1,05 до 2,29%. Достоверная зависимость между подвижной медью и ее валовым содержанием не установлена. Установлена тесная корреляционная связь между валовым содержанием меди и подвижными формами калия, гумуса и уровнем pH. Для подвижных форм меди отмечается средняя корреляционная связь с содержанием гумуса в почвах. Не установлена зависимость между подвижными формами меди и фосфора. Полученные данные могут быть использованы при экологическом мониторинге в качестве исходных, фоновых точек отчета при оценке степени загрязнения агроценозов, а также при прогнозировании действия меди в системе почва-растение в условиях юга Тюменской области.

**Ключевые слова:** медь, гумус, кислотность, почвы, Тюменская область.

**Сведения об авторах:** Синдирева Анна Владимировна, ORCID: 0000-0001-8596-7584, д-р биол. наук, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия, [sindireva72@mail.ru](mailto:sindireva72@mail.ru); Котченко Сергей Григорьевич, Государственная станция агрохимической службы «Тюменская», г. Тюмень, Россия, [agrohim\\_72\\_1@mail.ru](mailto:agrohim_72_1@mail.ru); Елизаров Олег Игоревич, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия, [elizarovloleg@yandex.ru](mailto:elizarovloleg@yandex.ru)

**Abstract.** The article presents data on the content of copper in the plow horizon of the main types of soils of the Tyumen region used in agricultural production, and determines the relationship of its distribution with the main physical and chemical indicators of soils (humus, pH, macroelements). To analyze the geochemical features of the microelement distribution in the soil cover, 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 FGBU GSAS "Tyumenskaya" on the survey of arable soils in the Tyumen region. In all studied types of soils in the south of the Tyumen region, excess of the permissible concentrations of copper is not observed. The content of mobile forms of copper, depending on the type and subtype of soils, varies in the range from 0.15 to 0.25 mg/kg, the total content ranges from 10 to 18 mg/kg. The ratio of the mobile form to the gross content is from 1.05 to 2.29%. A reliable relationship between mobile copper and its total content has not been established. A close correlation has been established between the total content of copper and mobile forms of potassium, humus and the pH level. For mobile forms of copper, there is an average correlation with the content of humus in soils. The relationship between the mobile forms of copper and phosphorus 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, as well as in predicting the effect of copper in the soil-plant system in the south of the Tyumen region.

**Keywords:** copper, humus, acidity, soils, Tyumen region.

**About the authors:** Sindireva Anna Vladimirovna, ORCID: 0000-0001-8596-7584, Dr. habil., Tyumen State University, Tyumen, Russia, [sindireva72@mail.ru](mailto:sindireva72@mail.ru); Kotchenko Sergey Grigorievich, State Station of the Agrochemical Service "Tyumenskaya", Tyumen, Russia [agrohim\\_72\\_1@mail.ru](mailto:agrohim_72_1@mail.ru); Elizarov Oleg Igorevich, Tyumen State University, Tyumen, Russia, [elizarovloleg@yandex.ru](mailto:elizarovloleg@yandex.ru)

Синдирева А.В, Котченко С.Г., Елизаров О.И. Экологическая оценка содержания меди в почвенном покрове на юге Тюменской области // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2022. № 1(57). С. 82–90. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/22-1/09>

Sindireva, A.V, Kotchenko, S.G. & Elizarov, O.I. (2022). Environmental Assessment of the Copper Content in the Soil Cover in the South of the Tyumen Region. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, (1(57)), 82–90. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/22-1/09>

**Введение.** Почвенно-растительные сообщества, вовлеченные в процесс сельскохозяйственного производства, испытывают на себе определенное негативное воздействие. Оно может выражаться как в избыточном накоплении микроэлементов ввиду применения различных химических препаратов. Также, это выражается в недостатке определенных микроэлементов, что может быть связано с выносом потоками вещества из экосистемы, а также спецификой местных геохимических условий. Содержание микроэлементов в почвах зависит от условий почвообразования, от 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 [9; 21]. 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 [2; 3] по изучению микроэлементного состава почв районов Тюменской области отмечается недостаточная обеспеченность многими важными для произрастания сельскохозяйственных растений элементами. Однако, в работе [14] автор отмечает тенденцию к накоплению тех или иных тяжелых металлов в сельскохозяйственных культурах, выращенных на различных типах почв юга Тюменской области. Таким образом, подчеркивается важность определения концентраций микроэлементов в различных типах почв, характеризующихся разнообразными физико-химическими параметрами. Важность изучения поведения тяжелых металлов в почвах подчеркивается и за рубежом. Например, в работах [24-28] отмечена важность изучения распределения и аккумуляции тяжелых металлов в почвенных агрегатах для выяснения поведения микроэлементов в окружающей среде. Например, изучена взаимосвязь концентраций тяжелых металлов (в том числе меди) с органическим веществом и pH почвы.

Среди микроэлементов, играющих неоднозначную роль в объектах окружающей среды, относят медь. С одной стороны, избыточное ее накопление в пищевых цепях в связи с техногенным поступлением, вызывает негативные последствия для живых организмов. С другой стороны, отмечается недостаток меди в системе почва-растение для ряда агроценозов. Медь представляет собой один из наиболее подвижных тяжелых металлов в гипергенных процессах. Тем не менее, её катионы обладают разнообразными свойствами и в почвах и осадках характеризуются склонностью к химическому взаимодействию с минеральными и органическими компонентами. Ионы меди способны также без усилий 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 [23]. Малая подвижность меди обуславливает проявления ее недостатка для сельскохозяйственных растений. Следует отметить, что медь имеет большое значение для растений, что объясняется тем, что она входит в

состав многих ферментов, при недостатке которых нарушаются такие физиологические процессы как фотосинтез, дыхание, перераспределение углеводов и белков [23].

Медь оказывает влияние на проницаемость сосудов ксилемы для воды, контролирует образование ДНК и РНК, и её дефицит значительно снижает репродукцию растений. Также медь влияет на механизмы, контролирующие устойчивость к заболеваниям. Для различных видов растений уровни концентраций, при которых наблюдается дефицит меди, сильно варьируют [23]. 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 данной работы* — установить взаимосвязь содержания меди с определенными агрохимическими показателями почв, способными потенциально повлиять на ее аккумуляцию в почве, в условиях юга Тюменской области.

**Экспериментальная часть.** При обобщении и анализе материала использовались собственные исследования и материалы отчетов ФГБУ ГСАС «Тюменская» по обследованию пахотных почв Тюменской области. Карта-схема участков отбора проб почвенных образцов в районах юга Тюменской области представлена на рисунке 1. Объектом исследования являлся пахотный горизонт почв, характерных для юга Тюменской области (табл. 1). Основные исследуемые типы и подтипы почв: глинистые аллювиально 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 пойменно аллювиальные – типичные (Тюменский район), среднесуглинистые пойменно-дерновые (Тобольский район) почвы. 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 пределах микро- и мезорельефа. В зависимости от величины элементарного участка из отобранных равномерно почвенных проб со всей площади, составлялась усредненная проба. Отбор почвенных 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 ФГБУ ГСАС «Тюменская». При этом оценивали данные о содержании гумуса, кислотности, содержание макроэлементов в пахотном горизонте (0-20 см) в почвах реперных участков. Содержание меди определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии, органическое вещество, рН солевой, подвижные соединения фосфора и калия – в соответствии с ГОСТ 26213-91. Почвы. В рамках исследования проведена оценка взаимосвязи содержания в почве меди (подвижных форм и валового количества) с физико-химическими параметрами почвы (гумусом и рН), а также подвижными формами ряда макроэлементов.

В работе использовали методы дисперсионного, регрессионного и корреляционного анализов [7; 15]. Математическая обработка результатов осуществлялась стандартными статистическими методами с использованием компьютерного пакета программ Excel.

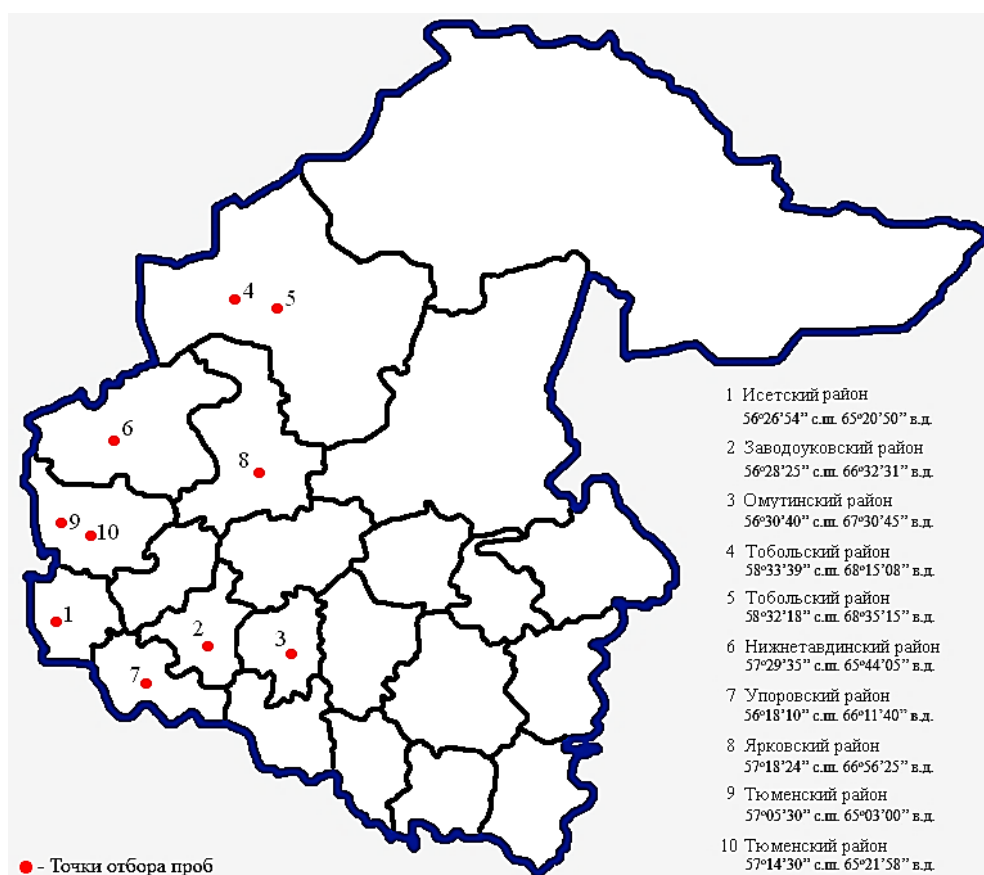


Рис. 1. Карта-схема точек отбора проб почвенных образцов в районах юга Тюменской области

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.

**Обсуждение результатов.** Рассмотрены основные типы почв юга Тюменской области, расположенных в южнотаежной лесной и лесостепной зонах. В пределах рассматриваемой территории выделяется несколько основных типов почв: аллювиальные луговые, чернозем выщелоченный, серая лесная, серая лесная – темно серая, серая лесная – светло серая, луговая глееватая, пойменная аллювиальная типичная, пойменная дерновая.

По гранулометрическому составу преобладают среднесуглинистые почвы. Содержание гумуса в пределах изученных реперных участков варьирует от 3,61% (Ярковский район) до 9,57% (Тюменский район). По значению pH почвы районов юга Тюменской области характеризуется кислой и слабокислой реакцией (4,2-5,6). Почвы отличаются значительной вариабельностью по содержанию макроэлементов.

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 [3].

Объектом исследования был пахотный горизонт (0-20 см) по следующим причинам: при антропогенном поступлении микроэлементы концентрируются в приповерхностном слое (в отличие от почв геохимически аномальных), большинство из них фиксируется в гумусовом

горизонте; в основном микроэлементы, сконцентрированные в пахотном горизонте, включаются в трофическую цепь. В таблице представлены данные о среднем содержании меди в пахотном горизонте изученных типов и подтипов почв юга Тюменской области.

Согласно данным таблицы 1, содержание подвижных форм меди в различных типах почв варьирует незначительно – от 0,16 до 0,25 мг/кг и не превышает установленных ПДК. Наибольшее содержание подвижной меди отмечается в пойменной дерновой почве и составляет 0,25 мг/кг. В целом по обеспеченности почв подвижной медью исследуемые почвы можно классифицировать как среднеобеспеченные [10].

Таблица

**Среднее содержание меди в пахотном горизонте почв юга Тюменской области**

Тип, подтип почвы	Содержание меди, мг/кг $\bar{X} \pm S_d$		Соотношение подвижного и валового содержания меди, %
	Подвижная форма	Валовое содержание*	
Аллювиальная луговая	0,16±0,03	—	
Чернозем выщелоченный	0,15±0,02	—	
Луговая глееватая	0,19±0,05	18,1±1,05	1,05
Серая лесная – темно серая	0,22±0,05	11,2±0,6	1,96
Серая лесная – светло серая	0,21±0,05	10,7±1,1	1,96
Пойменная аллювиальная типичная	0,20±0,02		
Пойменная дерновая	0,25±0,05	10,9±0,7	2,29
ПДК**	3,0	55	
ОДК***		66	

\* для почв аллювиальная луговая, чернозем выщелоченный и серая лесная данные по валовому содержанию меди отсутствуют

\*\* согласно Госкомприрода СССР, № 02-2333 от 10.12.90

\*\*\* ГН 2.1.7.020-94 Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах с различными физико-химическими свойствами (валовое содержание, мг/кг). (Дополнение N 1 к перечню ПДК и ОДК N 6229-91)

Исследованиями не установлена достоверная зависимость между подвижной медью и ее валовым содержанием, которое составляет в среднем 10-18 мг/кг. При этом наибольшее среднее содержание (18,1 мг/кг) отмечено в луговой глееватой почве. Необходимо отметить, что во всех изученных почвах не отмечается превышение установленных ПДК по валовому содержанию. Доля подвижной меди от валового содержания составляет от 1,05% до 2,29%. При этом наибольшая доля подвижной меди от общего содержания отмечается в пойменной дерновой почве.

Для выявления факторов, влияющих на концентрацию меди в верхнем слое 0-20 см почв был проведен корреляционный анализ их взаимосвязей с содержанием гумуса, pH, макроэлементами.

Для подвижных форм меди отмечается средняя корреляционная связь как с гумусом ( $r=0,50$ ). В связи с этим можно предположить, что на подвижность ионов меди в определенной степени влияет наличие органического вещества в почве. Несмотря на то, что ряд авторов отмечает увеличение подвижности тяжелых металлов при повышении кислотности, нашими исследованиями в среднем по изученным типам почв такой зависимости не установлено ( $r=0,16$ ). Однако данная зависимость может проявиться при изучении пары Cu-pH в пределах определенного типа почвы.

Для валового содержания меди прослеживается более тесная прямая взаимосвязь с количеством гумуса ( $r=0,61$ ) и обратная с реакцией среды ( $r=-0,84$ ) (рис. 2, 3).

На основе полученных данных можно сделать вывод, что на валовое содержание меди в почвах может влиять содержание органического вещества.



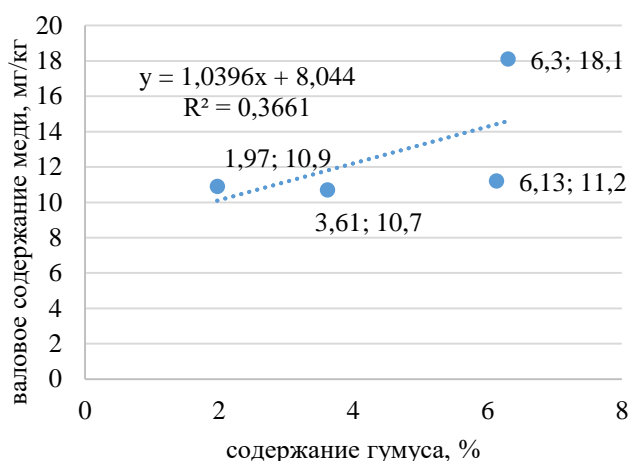


Рис. 2. Зависимость валового содержания меди от количества гумуса

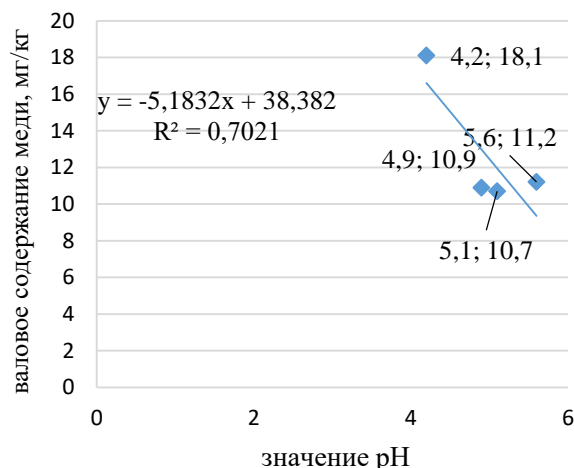


Рис. 3. Зависимость валового содержания меди от значения pH

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 [23].

Наибольший интерес представляет изучение зависимости между содержанием меди и подвижными формами азота, фосфора и калия, содержание которых значительно варьирует в зависимости от типа почв (рис. 4, 5).

Для подвижных форм меди и подвижных форм фосфора корреляционная связь практически отсутствует ( $r=0,036$ ). Подвижные формы меди и калия также имеют низкое значение корреляции между собой ( $r=0,48$ ).

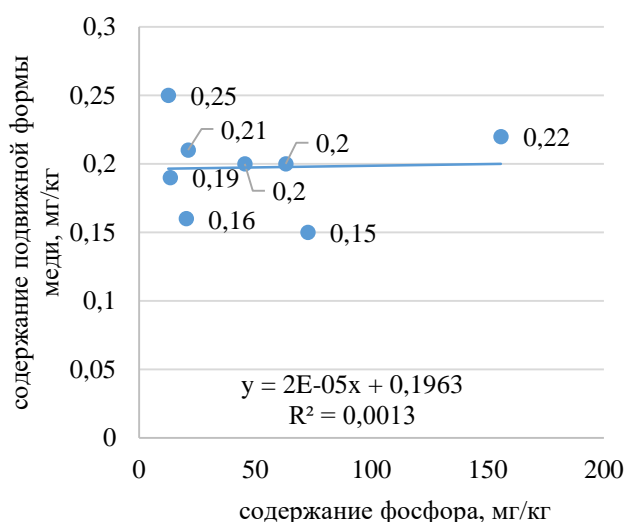


Рис. 4. Зависимость содержания подвижных форм меди и фосфора

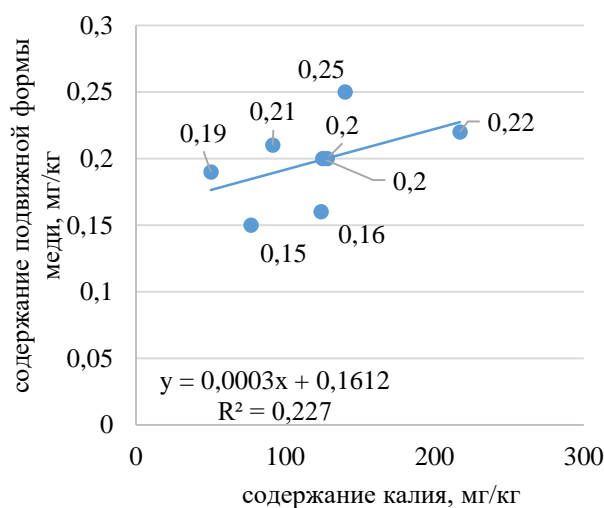


Рис. 5. Зависимость содержания подвижных форм меди и калия

Как показывают данные рисунка 5, взаимосвязь валового содержания меди и подвижных форм фосфора низкая ( $r=0,3$ ). Однако, с подвижными формами калия прослеживается прямая зависимость ( $r=0,65$ ), указывающая на возможное взаимовлияние данных микроэлементов (рис. 7).

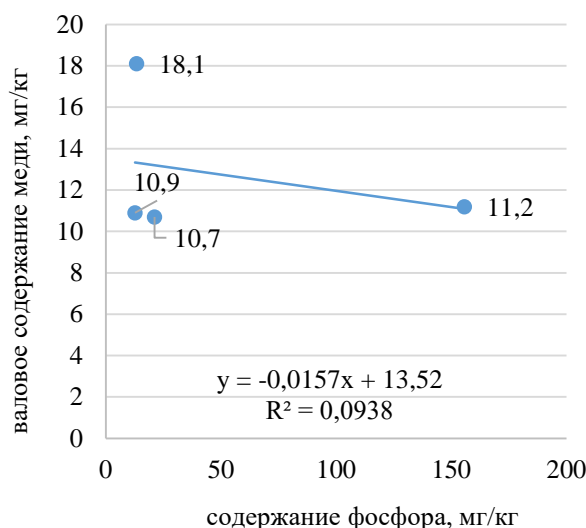


Рис. 6. Зависимость валового содержания меди и подвижного фосфора

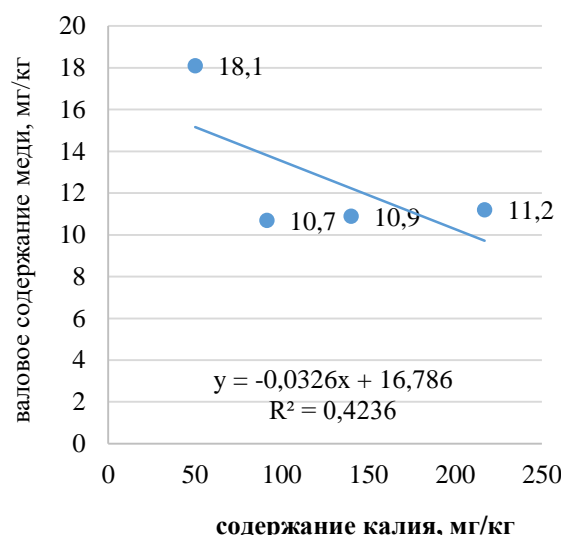


Рис. 7. Зависимость валового содержания меди и подвижного калия

**Выводы.** Таким образом, наиболее тесная корреляционная взаимосвязь меди характерна в большей степени для ее валового содержания с макроэлементами (подвижные формы калия) и параметрами среды (содержание гумуса и pH среды). Однако, в связи с многофункциональностью почвенных процессов, данные выводы следует дополнить анализом множеством других факторов и параметров почвенной среды, в комплексе влияющих на содержание тех или иных микроэлементов, а также их подвижность и, как следствие, доступность для растений.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Тюменской области  
в рамках научного проекта № 20-45-720011*

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. Быстрова О.Н., Гулевская В.В., Мартынкина Е.А., Никулина М.В., Омелянюк Г.Г., Федотов Г.Н. Распределение тяжелых металлов в агрегатах почв различных типов // Доклады Академии наук. 2008. Т. 40. №3. С. 346-350.
2. Гаевая Е.В., Захарова Е.В., Котченко С.Г., Ознобихина А.О., Скипин Л.Н. Особенности накопления тяжелых металлов в почвах северной лесостепи районов Тюменской области // Вестник КрасГАУ. 2018. №5. С. 252-257.
3. Гаевая 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.
4. Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование Тюменской области. М., 1973. 245 с.
5. ГН 2.1.7.020-94. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах с различными физико-химическими свойствами (валовое содержание, мг/кг).
6. 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.
7. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Изд-во: Агропромиздат, 1985. 351 с.
8. 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.: Изд-во МГУ, 1979. С. 324-350.
9. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение. М.: Наука. 1991. 152 с.
10. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение // Почвоведение. Деградация, восстановление и охрана почв. 2007. №9. С. 1112-1119.

11. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
12. Каримов Х.Н., Узиков З.З., Хушмуродов Ж.П. Исследование антропогенного загрязнения орошаемых лугово-сероземных почв тяжелыми металлами // Наука и мир. 2019. №11-1(75). С. 20-23.
13. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 264 с.
14. Котова Т.В. Содержание тяжелых металлов в зерновых культурах в зависимости от типа почв // Вестник КрасГАУ. 2008. №6. С. 46-48.
15. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
16. Методические рекомендации по определению нормативов соотношений макро- и микроэлементов в растениях по системе ИСОД. М. 1989. 80 с.
17. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1983. 193 с.
18. 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: Сборник трудов конференции. 2019. С. 538-541.
19. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почвах и допустимые уровни их содержания по показателям вредности (по состоянию на 01.01.1991. Госкомприрода СССР, № 02 2333 от 10.12.90.
20. Роева Н.Н., Воронич С.С., Зайцева И.А., Потапов С. А., Гречко Ю.А. Особенности поведения тяжелых металлов в почвах // Экологические системы и приборы. 2021. №7. С. 17-24.
21. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 277 с.
22. Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Книга 5. Экотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами. Пушино, 2001. 148 с.
23. Шеуджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп: Адыгея, 2003. 1028 с.
24. 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. 15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.604216>
25. Lisetskii F.N., Marinina O.A., Poletaev A.O., Zelenskaya E.Y. Comparative evaluation of pollution by heavy metals of ploughed and fallow land at various duration of agropedogenesis. 2020.
26. Liu Z., Lu B., Xiao H., Liu D., Li X., Wang L.A., Nagorskaya L. Effect of mixed solutions of heavy metal eluents on soil fertility and microorganisms // Environmental Pollution. 2019. Vol. 254. P. 112968. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.112968>
27. 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. P. 1-16. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1781840>
28. Wang P., Li Z., Liu J., Bi X., Ning Y., Yang S., Yang X. Apportionment of sources of heavy metals to agricultural soils using isotope fingerprints and multivariate statistical analyses // Environmental pollution. 2019. Vol. 249. P. 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.034>

## REFERENCES

1. Bystrova, O.N., Gulevskaya, V.V., Martynkina, E.A., Nikulina, M.V., Omel'yanyuk, G.G., & Fedotov, G.N. (2008). Raspredelenie tyazhelykh metallov v agregatakh pochv razlichnykh tipov. *Doklady Akademii nauk*, 40(3), 346-350. (in Russ.).
2. Gaevaya, E.V., Zakharova, E.V., Kotchenko, S.G., Oznobikhina, A.O., & Skipin, L.N. (2018). Osobennosti nakopleniya tyazhelykh metallov v pochvakh severnoi lesostepi raionov Tyumenskoi oblasti. *Vestnik KrasGAU*, (5), 252-257. (in Russ.).
3. Gaevaya, E.V., Zakharova, E.V., & Skipin, L.N. (2013). Biogeokhimiya elementov v sisteme pochva-rastenie-zhivotnoe v usloviyakh yuga Tyumenskoi oblasti. *Vestnik KrasGAU*, (11), 149-153. (in Russ.).
4. Gvozdetskii, N.A. (1973). Fiziko-geograficheskoe raionirovanie Tyumenskoi oblasti. Moscow. (in Russ.).
5. GN 2.1.7.020-94. Orientirovochno dopustimye kontsentratsii (ODK) tyazhelykh metallov i mysh'yaka v pochvakh s razlichnymi fiziko-khimicheskimi svoystvami (valovoe sodержание, mg/kg). (in Russ.).
6. Gruzdkov, D.Yu., Trifonova, T.A., & Shirkin, L.A. (2009). Otsenka migratsii tyazhelykh metallov v pochvakh. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 17, Pochvovedenie*, (4), 40-45. (in Russ.).
7. Dospekhov, B.A. (1985). Metodika polevogo opyta. Moscow. (in Russ.).
8. Zyryin, N.G., & Chebotareva, N.A. (1979). K voprosu o formakh soedinenii medi, tsinka, svintsa v pochvakh i dostupnosti dlya rastenii. In *Soderzhanie i formy soedinenii mikroelementov v pochvakh*, Moscow. 324-350. (in Russ.).
9. Il'in, V.B. (1991). Tyazhelye metally v sisteme pochva-rastenie. Moscow. (in Russ.).
10. Il'in, V.B. (2007). Tyazhelye metally v sisteme pochva-rastenie. *Pochvovedenie. Degradatsiya, vosstanovlenie i okhrana pochv*, (9), 1112-1119. (in Russ.).
11. Kabata-Pendias, A., & Pendias, Kh. (1989). Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh. Moscow. (in Russ.).



12. Karimov, Kh.N., Uzakov, Z.Z., & Khushmurodov, Zh.P. (2019). Issledovanie antropogennogo zagryazneniya oroshaemykh lugovo-serozemnykh pochv tyazhelymi metallami. *Nauka i mir*, (11-1(75)), 20-23. (in Russ.).
13. Kovda, V.A. (1985). Biogeokhimiya pochvennogo pokrova. Moscow. (in Russ.).
14. Kotova, T.V. (2008). Soderzhanie tyazhelykh metallov v zernovykh kul'turakh v zavisimosti ot tipa pochv. *Vestnik KrasGAU*, (6), 46-48. (in Russ.).
15. Lakin, G.F. (1990). Biometriya. Moscow. (in Russ.).
16. Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu normativov sootnoshenii makro- i mikroelementov v rasteniyakh po sisteme ISOD (1989). Moscow. (in Russ.).
17. Perel'man, A.I. (1983). Geokhimiya landshafta. Moscow. (in Russ.).
18. Pinskii, D.L., & Minkina, T.M. (2019). K voprosu o mekhanizмах transformatsii i akumulatsii tyazhelykh metallov v pochvakh. In *Fundamental'nye kontseptsii fiziki pochv: razvitie, sovremennye prilozheniya i perspektivy: Sbornik trudov konferentsii*, 538-541. (in Russ.).
19. Predel'no-dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochvakh i dopustimye urovni ikh soderzhaniya po pokazatelyam vrednosti (po sostoyaniyu na 01.01.1991. Goskompriroda SSSR, № 02 2333 ot 10.12.90. (in Russ.).
20. Roeva, N.N., Voronich, S.S., Zaitseva, I.A., Potapov, S.A., & Grechko, Yu.A. (2021). Osobennosti povedeniya tyazhelykh metallov v pochvakh. *Ekologicheskie sistemy i pribory*, (7), 17-24. (in Russ.).
21. Syso, A.I. (2007). Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoi Sibiri. Novosibirsk. (in Russ.).
22. Chernykh, N.A., Milashchenko, N.Z., & Ladonin, V.F. (2001). Ekologicheskaya bezopasnost' i ustoichivoe razvitie. In *Ekotoksikologicheskie aspekty zagryazneniya pochv tyazhelymi metallami. Pushchino*. (in Russ.).
23. Sheudzhen, A.Kh. (2003). Biogeokhimiya. Maikop. (in Russ.).
24. González Henao, S., & Ghneim-Herrera, T. (2021). Heavy metals in soils and the remediation potential of bacteria associated with the plant microbiome. *Frontiers in Environmental Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.604216>
25. Lisetskii, F. N., Marinina, O. A., Poletaev, A. O., & Zelenskaya, E. Y. (2020). Comparative evaluation of pollution by heavy metals of ploughed and fallow land at various duration of agropedogenesis.
26. Liu, Z., Lu, B., Xiao, H., Liu, D., Li, X., Wang, L. A., ... & Nagorskaya, L. (2019). Effect of mixed solutions of heavy metal eluents on soil fertility and microorganisms. *Environmental Pollution*, 254, 112968. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.112968>
27. Shen, Q., Xiang, J., & Zhang, M. (2020). Distribution and chemical speciation of heavy metals in various size fractions of aggregates from zonal soils. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1781840>
28. Wang, P., Li, Z., Liu, J., Bi, X., Ning, Y., Yang, S., & Yang, X. (2019). Apportionment of sources of heavy metals to agricultural soils using isotope fingerprints and multivariate statistical analyses. *Environmental pollution*, 249, 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.034>

дата поступления: 25.10.2021

дата принятия: 03.12.2021

© Синдирева А.В., Котченко С.Г., Елизаров О.И., 2022