

УДК 631.416.9+574.2

Оценка содержания селена в почвах и растениях на примере степной и лесостепной зон Челябинской области

М. А. Белов

Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия;
e-mail: m.blvv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4910-5671>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
03.12.2025;
получена
после доработки
19.01.2026;
принята
к публикации
22.01.2026

В исследовании проанализировано содержание селена в почвах и растениях шести муниципальных районов Челябинской области: Чесменского, Троицкого, Пластовского, Увельского, Еманжелинского и Еткульского. Пробы были отобраны в период созревания сельскохозяйственных культур (август – сентябрь 2023–2024 гг.) и включали злаковые и масличные культуры. Почвы представлены обыкновенными и выщелоченными черноземами. Результаты показали, что среднее содержание селена варьирует от 0,1204 мг/кг в Пластовском районе до 0,2679 мг/кг в Еманжелинском. В зоне оптимума находятся 42 % проб, в то время как в зонах маргинальной недостаточности и селенодефицита – 27 и 31 % проб соответственно. Выщелоченные черноземы имеют более высокое содержание селена (0,20 мг/кг) по сравнению с обыкновенными черноземами (0,13 мг/кг). Анализ корреляционных зависимостей выявил отрицательную связь между содержанием селена и уровнем pH почвы, особенно в Чесменском и Увельском районах. В других районах эта связь менее выражена, что указывает на влияние таких факторов, как состав почвы и антропогенное воздействие. Исследование показало, что пшеница более эффективно накапливает селен по сравнению с подсолнечником. Коэффициент биологического поглощения селена варьирует в зависимости от типа почвы и вида растения. Установлена зависимость содержания селена от содержания тяжелых металлов в почвах. Полученные данные подчеркивают необходимость дальнейших исследований для разработки дифференцированных стратегий улучшения селенового статуса сельскохозяйственных угодий и повышения урожайности культур.

Ключевые слова:

селен, почва,
растения,
селенодефицит,
чернозем,
Челябинская область

Для цитирования

Белов М. А. Оценка содержания селена в почвах и растениях на примере степной и лесостепной зон Челябинской области. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 54–63. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-54-63>.

Assessment of selenium content in soils and plants using the example of steppe and forest-steppe zones of the Chelyabinsk region

Maxim A. Belov

Tumen State University, Tumen, Russia;
e-mail: m.blvv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4910-5671>

Article info

Received
03.12.2025;
received
in revised form
19.01.2026;
accepted
22.01.2026

Abstract

The study analyzes the selenium content in the soils and plants of six municipal districts of the Chelyabinsk region: Chesmenskiy, Troitskiy, Plastovskiy, Uvelskiy, Yemanzhelinskiy and Etkulskiy. The samples were taken during the ripening period of agricultural crops (August – September 2023–2024) and included cereals, buckwheat and oilseeds. The soils are represented by ordinary and leached chernozems. The results have shown that the average selenium content varies from 0.1204 mg/kg in the Plastovsky district to 0.2679 mg/kg in the Yemanzhelinsky one. 42 % of samples are in the optimum zone, while 27 and 31 % of samples are in the zones of marginal insufficiency and selenium deficiency, respectively. Leached chernozems have higher selenium content (0.2009 mg/kg) compared to ordinary chernozems (0.1344 mg/kg). The analysis of correlations has revealed a negative relationship between the selenium content and the pH level of the soil, especially in the Chesmenskiy and Uvelskiy districts. In other areas, this relationship is less pronounced, indicating the influence of other factors such as soil composition and anthropogenic influences. The study has shown that wheat and buckwheat accumulate selenium more efficiently than sunflower. The coefficient of biological absorption of selenium varies depending on the type of soil and the type of plant. The dependence of selenium content on the content of heavy metals (lead, zinc) in soils has been established. The influence of heavy metals on the selenium content varies depending on the area, which is related to the peculiarities of soil conditions and anthropogenic load. The data obtained emphasize the need for further research to develop differentiated strategies for improving the selenium status of agricultural land and increasing crop yields.

Key words:

selenium, soil,
plants,
selenium deficiency,
chernozem,
Chelyabinsk region

For citation

Belov, M. A. 2026. Assessment of selenium content in soils and plants using the example of steppe and forest-steppe zones of the Chelyabinsk region. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 54–63. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-54-63>.

Введение

Челябинская область отличается высоким уровнем промышленного и сельскохозяйственного производства. Промышленные объекты, такие как металлургические и химические предприятия, выбрасывают в окружающую среду загрязняющие вещества, включая соединения тяжелых металлов, что может оказывать негативное воздействие на здоровье населения. Одним из проявлений такого воздействия является развитие оксидативного стресса (Белов и др., 2024).

Оксидативный стресс представляет собой патологическое состояние, обусловленное нарушением баланса между образованием активных форм кислорода и антиоксидантной защитой организма. Накопление свободных радикалов и реактивных кислородосодержащих соединений приводит к повреждению клеточных структур, что может вызвать нарушение функций клеток и тканей. Для нейтрализации оксидативного стресса и минимизации его негативных последствий необходимо применение антиоксидантов – соединений, способных ингибировать процессы окисления. Среди них особое значение имеет селен, который входит в состав селеносодержащих ферментов, таких как глутатионпероксидаза (Белов и др., 2024).

Селен (Se) является важным микроэлементом, который играет ключевую роль в биохимических процессах растений, животных и человека. Он участвует не только в антиоксидантной защите организма, но и в регуляции иммунной системы и метаболизме гормонов щитовидной железы (Боев, 2013; Бубнова и др., 2023; Голубкина и др., 2017; Ермаков и др., 2010; Капитальчук и др., 2011). Дефицит селена может приводить к различным заболеваниям, включая сердечно-сосудистые патологии, онкологические заболевания и нарушения эндокринной системы. Переизбыток селена в организмах также представляет опасность. Избыток селена может вызывать повреждение печени и нарушение функции щитовидной железы, что приводит к гормональному дисбалансу. Развивается селеноз, который проявляется с выпадением волос, ломкостью ногтей и изменениями кожи (Козлова и др., 2018; Побилат и др., 2020; Серегина, 2018; Синдирева и др., 2021; Qu et al., 2023). Повышается риск возникновения диабета и аритмии, так как избыточное количество селена влияет на иммунную систему (Шеуджен и др., 2013; 2018; Шешницан и др., 2017; Saha et al., 2017).

Челябинская область является важным аграрным регионом России, где выращиваются различные сельскохозяйственные культуры, включая злаковые и масличные. Содержание селена в почвах и растениях напрямую влияет на качество и безопасность сельскохозяйственной продукции. Дефицит или профицит селена в почвах может приводить к снижению урожайности и ухудшению качества продукции, что негативно сказывается на экономике региона и здоровье населения (El-Ramady et al., 2015; Kushwaha et al., 2022; Lopes et al., 2017; Semenova et al., 2017).

В современных условиях наблюдается дефицит микроэлементов в объектах окружающей среды, что характерно и для Челябинской области. В настоящее время отсутствуют систематизированные данные о содержании селена в системе почва – растение на территории многих районов региона.

Целью исследования является оценка уровня содержания селена в почвах сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства в условиях степной и лесостепной зон Челябинской области.

Материалы и методы

Пробы отбирались в период созревания сельскохозяйственных культур (август – сентябрь) 2023–2024 гг. Образцы почв и растений отобраны в центральной части региона, а именно на территории Чесменского, Троицкого, Пластовского, Увельского, Еманжелинского и Еткульского районов. Всего с 48 площадок отобрано 50 проб почвы (13 – чернозема обыкновенного, 37 – чернозема выщелоченного) и 48 проб растений, из них 31 – злаковые культуры (пшеница яровая/*Triticum aestivum* L.) и 17 – масличные (подсолнечник обыкновенный/*Helianthus annuus* L.). Места отбора проб показаны на рис. 1.

Отбор проб растений был проведен в соответствии с ГОСТ Р 58588-2019 "Отбор и подготовка растительных проб для изотопного анализа"¹. Почвы собирались с пахотного горизонта сельскохозяйственных угодий на глубине 0–20 см, следуя требованиям ГОСТ 17.4.3.01-83 "Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб"². Подготовка почвенных проб осуществлялась в соответствии с методическими указаниями РД 52.18.191-89 "Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом" (Москва, 1990). Пробоподготовка растений выполнялась по "Методическим указаниям по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства" (Москва, 1992) и методике

¹ ГОСТ Р 58588-2019. Отбор и подготовка растительных проб для изотопного анализа. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293726/4293726653.pdf?ysclid=mlaiiqakhh271147650>.

² ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/99d/4294849589.pdf?ysclid=mlaik3jqfd141966782>.

ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 "Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой" (Москва, 1998)³.

Исследования содержания тяжелых металлов и селена проводились методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой согласно ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Результаты были получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Рациональное природопользование и физико-химические исследования" Тюменского государственного университета.



Рис. 1. Картосхема отбора проб почвы и растений в пределах Челябинской области
Fig. 1. Cartography of soil and plant sampling in the Chelyabinsk region

Полученные данные обработаны с использованием стандартных статистических методов в программном пакете Microsoft Excel. Для глубокого анализа данных рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона, вариации и биологического поглощения. Коэффициент биологического поглощения вычисляется как отношение содержания элементов в растениях к содержанию их кислоторастворимых форм в почве, что позволяет оценить эффективность поглощения и удержания элементов растениями.

Результаты и обсуждение

Исследованные районы Челябинской области значительно различаются по степени воздействия человека на окружающую среду. Их можно расположить в порядке уменьшения антропогенной нагрузки.

Троицкий район является территорией с максимальной нагрузкой, где наибольший вклад вносят объекты теплоэнергетики и тяжелой промышленности. Пластовский район имеет специализацию на горнодобывающем и перерабатывающем комплексах. В Увельском районе ключевым фактором выступает добыча нерудных строительных материалов с сопутствующим пылевым загрязнением. Еманжелинский район имеет комплексную нагрузку, сочетающую наследие угледобычи (деградированные земли, породные отвалы) с воздействием действующих перерабатывающих и машиностроительных предприятий. В Еткульском районе антропогенное влияние обусловлено предприятиями по добыче и обработке природного камня (мрамор, гранит), а также агротехногенными факторами. Чесменский район отличается наименьшим уровнем прямой техногенной нагрузки. Основное воздействие связано с сельскохозяйственной деятельностью, в то

³ Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. РД 52.18.191-89. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/35b/4293849262.pdf?ysclid=mlai4g8dhw728836833> ; Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства (изд. 2-е, перераб. и допол.). URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/987/4293771886.pdf?ysclid=mlai8gl51u146721160> ; Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/19e/4293777593.pdf?ysclid=mlaie2shuw507135199>.

время как промышленные объекты (добыча медной руды, огнеупорных глин) территориально удалены от населенных пунктов и агроценозов, что минимизирует их локальное влияние (Белов и др., 2024; Белов и др., 2025).

В рамках исследования получена информация о содержании селена в почвах шести муниципальных районов Челябинской области. Данные представлены на рис. 2.

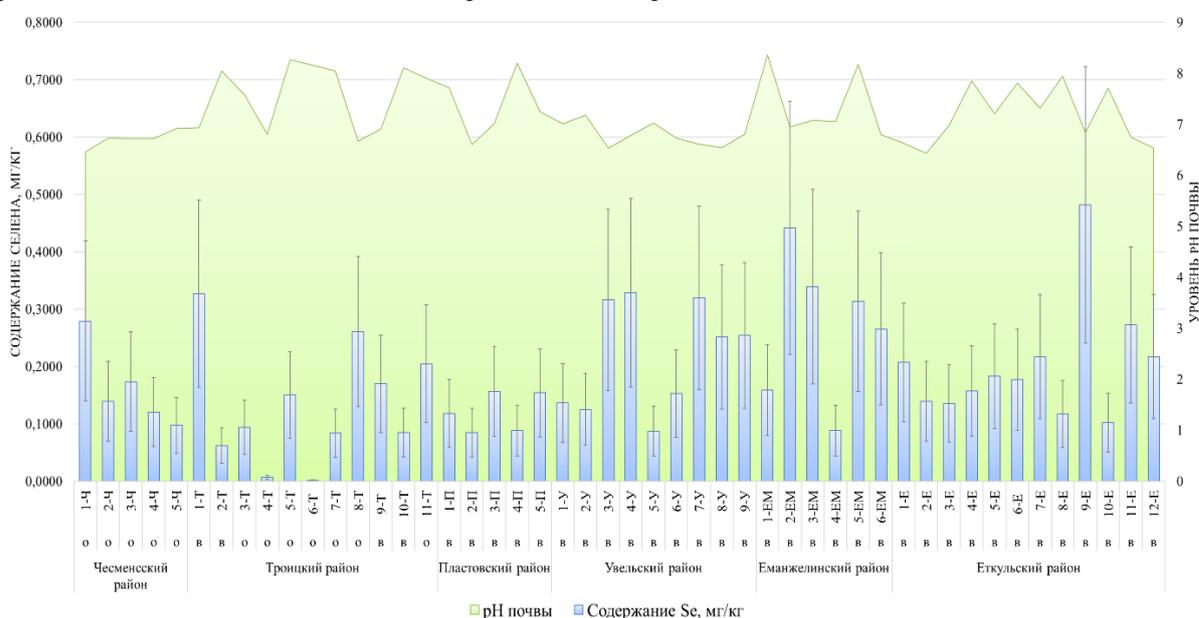


Рис. 2. Содержание кислоторастворимых форм селена в пробах почвы Челябинской области: о – чернозем обыкновенный; в – чернозем выщелоченный

Fig. 2. The content of acid-soluble forms of selenium in soil samples of the Chelyabinsk region: о – ordinary chernozem; в – leached chernozem

В соответствии с полученными данными содержание селена в пробах почвы Чесменского района варьирует от 0,0976 до 0,2794 мг/кг (среднее содержание 0,1620 мг/кг), в Троицком районе от 0,0014 до 0,3266 мг/кг (среднее содержание 0,1249 мг/кг), Пластовском районе от 0,0849 до 0,1563 мг/кг (среднее содержание 0,1204 мг/кг), Увельском районе от 0,0872 до 0,3289 мг/кг (среднее содержание 0,2135 мг/кг), Еманжелинском районе от 0,0884 до 0,4417 мг/кг (среднее содержание 0,2679 мг/кг) и Еткульском районе от 0,1022 до 0,4820 мг/кг (среднее содержание 0,1994 мг/кг).

Для оценки уровня содержания селена в почве приняты следующие значения: менее 0,125 мг/кг – область селенодефицита; 0,125–0,175 мг/кг – маргинальная недостаточность; 0,175–3 мг/кг – область оптимума; более 3 мг/кг – область селенопрофицита (Tan et al., 2002).

Согласно пороговым значениям в области оптимума находятся: одна проба Чесменского района (1), три пробы Троицкого района (1, 8 и 11), пять проб Увельского района (3, 4, 7–9), четыре пробы Еманжелинского района (2, 3, 5, 6) и семь проб Еткульского района (1, 5–7, 9, 11, 12). Таким образом, двадцать проб располагаются в зоне оптимума, что составляет 42 % от общего числа проб. Остальные пробы находятся в зоне маргинальной недостаточности (13 проб) и селенодефицита (15 проб), что составляет 27 и 31 % от общего числа проб соответственно.

Рассчитан коэффициент корреляции Пирсона между содержанием селена и уровнем pH почвы для всех районов, полученные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициент корреляции Пирсона между содержанием селена и уровнем pH в почвах Челябинской области

Table 1. Pearson correlation coefficient between selenium content and pH level in soils of the Chelyabinsk region

Природная зона	Район исследования	Количество проб почвы	Тип почвы	Значение коэффициента
Степная	Чесменский	5	Чернозем обыкновенный	$r = -0,935, p = 0,020-0,924$
	Троицкий	11		$r = -0,455, p = 0,159-0,380$
Лесостепная	Пластовский	5	Чернозем выщелоченный	$r = -0,199, p = 0,748-0,201$
	Увельский	9		$r = -0,774, p = 0,014-0,776$
	Еманжелинский	6		$r = -0,243, p = 0,643-0,245$
	Еткульский	12		$r = -0,391, p = 0,208-0,308$

Согласно полученным данным во всех образцах почвы наблюдается отрицательная корреляционная связь. Очень сильная отрицательная связь – в пробах Чесменского и Увельского районов. Это означает, что с увеличением рН почвы значительно снижается содержание селена. Такая зависимость может быть связана с тем, что в щелочных условиях селен становится более доступным для растений. В щелочных и хорошо аэрируемых почвах преобладают селенаты – легкорастворимые соединения, которые слабо фиксируются оксидами железа и достаточно подвижны, что делает их доступными (Шеуджен и др., 2018).

В пробах Троицкого и Еткульского районов наблюдается слабая отрицательная связь. В этих районах имеется небольшая обратная зависимость между уровнем рН и содержанием селена. Это может указывать на то, что кислотность почвы оказывает влияние на селен, но его роль не является доминирующей.

Очень слабая отрицательная связь наблюдается в пробах Пластовского и Еманжелинского районов. Это говорит о том, что линейная зависимость между уровнем рН и содержанием селена практически отсутствует. Это может означать, что другие факторы (например, тип почвы, ее агрохимические характеристики, гранулометрический состав или взаимодействие с другими элементами) играют более важную роль в распределении селена (Шеуджен и др., 2018; Синдирева и др., 2021).

Анализ коэффициентов корреляции показывает, что связь между уровнем рН почвы и содержанием селена варьирует в зависимости от района. Также стоит отметить, что во всех случаях связь отрицательная, т. е. чем выше уровень рН (щелочнее почва), тем меньше в ней селена. В Чесменском и Увельском районах наблюдается сильная отрицательная связь, что указывает на значительное влияние кислотности почвы на содержание селена. В остальных районах связь слабая или отсутствует.

Проведен анализ содержания селена в разных типах чернозема, данные представлены на рис. 3.

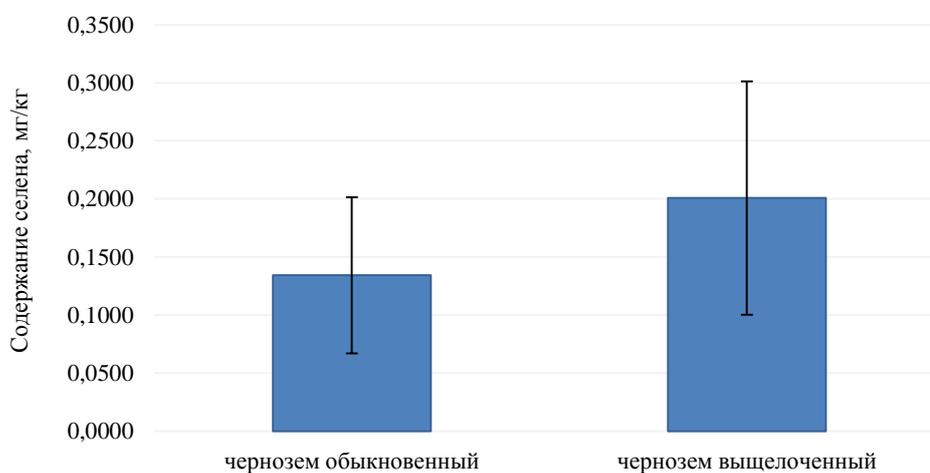


Рис. 3. Среднее содержание селена в обыкновенных и выщелоченных черноземах Челябинской области
 Fig. 3. The average selenium content in ordinary and leached chernozems of the Chelyabinsk region

Среднее содержание селена в черноземе обыкновенном составляет 0,1344 мг/кг. Черноземы обыкновенные характеризуются высоким содержанием гумуса, что способствует накоплению химических элементов, включая селен. Однако в данном случае содержание селена относительно ниже по сравнению с черноземом выщелоченным. Это может быть связано с тем, что в обыкновенных черноземах селен менее доступен для растений из-за связывания с органическим веществом или другими элементами (Побилат и др., 2020; Голубкина и др., 2017).

Среднее содержание селена в черноземе выщелоченном составляет 0,2009 мг/кг. Черноземы выщелоченные отличаются более интенсивным процессом выщелачивания, что приводит к уменьшению содержания карбонатов и изменению химического состава почвы. Однако содержание селена в таких почвах выше, чем в черноземах обыкновенных.

Рассчитан коэффициент вариации (CV), который отражает степень изменчивости содержания селена в разных типах почв. Это поможет понять, насколько стабильно или нестабильно распределение селена в почве. В данном случае CV показывает, что содержание селена в черноземах выщелоченных (CV = 52,03 %) более изменчиво, чем в черноземах обыкновенных (CV = 77,24 %). Это указывает на то, что в выщелоченных черноземах селен распределен менее стабильно, возможно, из-за влияния рН, состава почвы, климатических условий или антропогенных факторов. В обыкновенных черноземах селен имеет более стабильное распределение, хотя его содержание все равно подвержено изменчивости.

Рассчитан коэффициент биологического поглощения (КБП) селена для каждого района. КБП > 1 указывает на активное накопление селена растением, а КБП < 1 – на слабое накопление. Данные представлены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициент биологического поглощения селена
Table 2. Coefficient of biological absorption of selenium

Тип почвы	Вид растения	Значение коэффициента
Чернозем обыкновенный	Пшеница	1,5
	Подсолнечник	0,8
Чернозем выщелоченный	Пшеница	1,2
	Подсолнечник	1,0

КБП отражает способность растений накапливать определенные элементы из почвы. В данном случае анализируется накопление селена различными растениями на двух типах почв: черноземе обыкновенном и черноземе выщелоченном.

Согласно полученным данным установлено, что вид растения и тип почвы оказывают значительное влияние на коэффициент биологического накопления селена. Пшеница проявляет более высокую способность к накоплению селена. У подсолнечника поглощение может быть ниже, чем у злаков, из-за различий в метаболических потребностях и механизмах транслокации (Побилат и др., 2020).

Высокая эффективность пшеницы обусловлена ее способностью активно поглощать селен через сульфатные транспортеры из-за химического сходства с серой. Пшеница является ведущим зерновым источником Se, преобразуя его в наиболее доступную форму – селенометионин (Семенова, 2025; Тутов и др., 2021).

Еще одним фактором, влияющим на содержание селена, является наличие тяжелых металлов (Боев, 2013; Голубкина и др., 2017; Ермаков и др., 2010; Синдирева и др., 2018). Эти элементы могут влиять на содержание селена в растениях через конкурентное поглощение и транспорт, изменяя доступность селена в почве. Например, свинец часто снижает накопление селена, конкурируя за корневые каналы поглощения, тогда как цинк и медь в низких концентрациях могут способствовать его усвоению. Кроме того, тяжелые металлы вызывают окислительный стресс, увеличивая расход селена, который участвует в антиоксидантной защите растений. Содержание элементов представлено в табл. 3.

Таблица 3. Среднее содержание элементов во всех растениях агроценозов
Table 3. The average content of elements in all plants of agrocenoses

Природная зона	Район исследования	Вид растения	Среднее содержание элементов, мг/кг					
			Cu	Cr	Mn	Zn	Pb	Se
Степная	Чесменский	Пшеница	1,68	0,29	26,30	16,28	0,00	0,10
		Подсолнечник	11,38	0,00	9,76	27,56	0,00	0,07
	Троицкий	Пшеница	2,44	10,71	26,86	17,36	0,00	0,13
		Подсолнечник	9,44	6,66	9,67	15,98	0,00	0,19
Лесостепная	Пластовский	Пшеница	1,53	0,00	9,68	22,67	0,00	0,19
		Подсолнечник	7,95	0,00	8,98	23,56	0,00	0,17
	Увельский	Пшеница	2,67	7,74	25,52	16,86	0,00	0,17
		Подсолнечник	9,93	9,51	10,70	16,69	0,00	0,16
	Еманжелинский	Пшеница	2,04	0,00	16,02	17,12	0,85	0,20
		Подсолнечник	5,19	5,04	29,90	19,65	0,00	0,20
	Еткульский	Пшеница	3,11	13,41	37,39	14,94	0,00	0,19
		Подсолнечник	6,29	7,13	16,85	18,90	0,00	0,17

На основе полученных данных проведен корреляционный анализ между содержанием селена и тяжелых металлов в растениях. Выявленные взаимосвязи можно представить в следующем виде:

Чесменский район: Cu > Zn > Cr > Mn;

Троицкий район: Cu > Mn > Cr > Zn;

Пластовский район: Zn > Mn > Cr > Cu;

Увельский район: Zn > Mn > Cu > Cr;

Еманжелинский район: Cr > Zn > Cu > Mn;

Еткульский район: Zn > Mn > Cu > Cr.

Полученные данные свидетельствуют о том, что на содержание селена в растениях различных районов в основном оказывают влияние такие тяжелые металлы, как медь и цинк. Однако в зависимости от природно-антропогенных факторов районов их влияние может варьировать.

Цинк и медь являются важными микроэлементами, необходимыми для нормального роста растений. Однако их избыток в почве может снижать доступность селена. Данные элементы могут конкурировать с селеном за места связывания в почве и растительных тканях, образуя нерастворимые соединения, что уменьшает подвижность и биодоступность селена (Голубкина и др., 2017). Это приводит к снижению

накопления селена в растениях, особенно в условиях его дефицита. Кроме того, высокие концентрации цинка и меди могут подавлять микробиологическую активность почвы, что также снижает подвижность селена (Козлова и др., 2017; Козлова и др., 2018).

По полученным данным содержание селена в почвах исследуемых районов преимущественно зависит от цинка и меди, которые конкурируют с селеном за биодоступность, формируя нерастворимые соединения и снижая его усвоение растениями. Влияние других металлов (Cr, Mn) варьирует в зависимости от локальных природных условий, таких как кислотность почвы и др. Для оптимизации содержания селена в агроэкосистемах необходим учет региональной специфики взаимодействия металлов и разработка мер по снижению их токсичного воздействия.

Для сравнения содержания селена в черноземах выщелоченных взяты результаты исследования в почвах Тюменской области (Синдирева и др., 2021). Согласно этим исследованиям содержание селена в черноземах Челябинской области (0,2 мг/кг) больше в 2,5 раза, чем в черноземах Тюменской области (0,08 мг/кг).

По данным этих исследований (Боев, 2013) содержание селена в пшенице, выращенной в Тюменской области, показывает аналогичную ситуацию. Уровень селена в пшенице Тюменской области варьирует от 0,03 до 0,08 мг/кг, что значительно ниже, чем в пшенице Челябинской области. Такая разница может быть связана с тем, что в Тюменской области преобладают менее плодородные почвы с пониженным содержанием органических веществ и иным кислотнo-щелочным балансом.

Для сравнения содержания селена в пшенице яровой взяты результаты исследования на территории центральной лесостепи Среднего Поволжья (Вихреева и др., 2011). На основании сравнения данных по содержанию селена в пшенице выявлена существенная количественная разница между Челябинской областью и Средним Поволжьем. В Челябинской области пшеница содержит 0,10–0,20 мг/кг, что в 3–10 раз выше, чем показатели по яровой пшенице в Пензенской области (0,019–0,047 мг/кг). Несмотря на различия в абсолютных значениях, оба региона имеют общую закономерность – накопление селена в зерновых культурах определяется местными почвенными условиями (Вихреева и др., 2011).

Заключение

В ходе проведенного исследования были получены данные о содержании селена в почвах и растениях шести муниципальных районов Челябинской области. Анализ показал, что содержание селена в почвах варьирует в зависимости от района и типа чернозема. Среднее содержание селена в выщелоченных черноземах (0,20 мг/кг) выше, чем в обыкновенных черноземах (0,13 мг/кг), что может быть связано с доступностью данного химического элемента.

Установлено, что 42 % проб почв находятся в зоне оптимума по содержанию селена, в то время как 27 и 31 % проб находятся в зонах маргинальной недостаточности и селенодефицита соответственно. Анализ корреляции показал, что содержание селена в почвах отрицательно коррелирует с уровнем pH, особенно в Чесменском и Увельском районах. Это свидетельствует о том, что в щелочных условиях селен становится более доступным для растений. В других районах связь между pH и содержанием селена была менее выражена. Исследование также выявило значительные различия в коэффициентах биологического поглощения селена различными растениями. Пшеница имеет более высокую способность к накоплению селена по сравнению с подсолнечником, что может быть использовано для разработки стратегий по улучшению селенового статуса сельскохозяйственных культур.

Полученные данные свидетельствуют о необходимости дальнейших исследований для более детального понимания факторов, влияющих на содержание селена в почвах и растениях. Это позволит разработать эффективные меры по улучшению селенового статуса сельскохозяйственных угодий и повышению урожайности культур.

Благодарности

Автор выражает благодарность д-ру биол. наук, доценту, зав. кафедрой геоэкологии и природопользования Школы естественных наук Тюменского государственного университета А. В. Синдиревой за ценные советы и конструктивные комментарии по улучшению рукописи.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Белов М. А., Беккер М. Р., Синдирева А. В., Шигабаева Г. Н. Оценка содержания тяжелых металлов в почвах и растениях степной и лесостепной зон Челябинской области // Региональные геосистемы. 2025. Т. 49, № 4. С. 651–668. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-1. EDN: CJEZO.
- Белов М. А., Синдирева А. В. Оценка содержания селена в системе почва – растение в лесостепной и степной зоне Челябинской области // Социально-экологические технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 496–511. DOI: <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2024-14-4-496-511>. EDN: CGWPBO.

- Боев В. А. Селен в почвах и сельскохозяйственных культурах юга Тюменской области // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2013. № 12. С. 112–120. EDN: SEPHCD.
- Бубнова Н. В., Тимофеева Н. Ю., Кострова О. Ю., Стручко Г. Ю. [и др.]. Биологическая роль селена (обзор литературы) // Acta Medica Eurasica. 2023. № 2. С. 114–123. DOI: <https://doi.org/10.47026/2413-4864-2023-2-114-123>. EDN: GPWVYW.
- Вихрева В. А., Лебедева Т. Б., Надежкина Е. В. Накопление селена лугово-степными и сельскохозяйственными растениями на черноземах выщелоченных лесостепи Среднего Поволжья // Агрохимия. 2011. № 7. С. 63–70. EDN: NXRYFR.
- Голубкина Н. А., Синдирева А. В., Зайцев В. Ф. Внутрирегиональная вариабельность селенового статуса населения // Юг России: экология, развитие. 2017. № 1. С. 107–127. EDN: YIELCF.
- Ермаков В. В., Воронцова О. В. Биогеохимия селена в почвах // Развитие идей континентальной биогеохимии и геохимической экологии (2006–2010 гг.). БИОГЕЛ : материалы VI–XII Биогеохимических чтений памяти В. В. Ковальского (1899–1984). М. : ГЕОХИ, 2010. С. 268–287.
- Капитальчук И. П., Голубкина Н. А., Капитальчук М. В. Селен и его антагонисты в биогеохимической цепи почва – растение в условиях Приднестровья // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2011. № 2. С. 137–141. EDN: NRBERH.
- Козлова Г. Г., Онина С. А., Минина Н. Н., Михайлова А. С. Определение содержания селена и тяжелых металлов в растительном сырье и прикорневой почве // Проблемы региональной экологии. 2018. № 4. С. 22–24. DOI: <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14022>. EDN: YNKQPI.
- Козлова Г. Г., Онина С. А., Якиева М. Н., Минина Н. Н. [и др.] Определение содержания селена и элементов-антагонистов в почве и в растительном сырье Бирского района республики Башкортостан // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 3. С. 150–157.
- Побилат А. Е., Волошин Е. И. Особенности содержания селена в системе почва – растение (обзор) // Вестник КрасГАУ. 2020. № 11(164). С. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-11-98-105>. EDN: XGTTJW.
- Семенова Н. А. Селен-биофортификация сельскохозяйственных культур // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2025. № 10–1(109). С. 355–363. DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2025-10-1-355-363>. EDN: XZJBVW.
- Серегина И. И. Цинк, селен и регуляторы роста в агроценозе : монография. М. : Проспект, 2018. 219 с.
- Синдирева А. В., Котченко С. Г., Гурьев Н. Е. Геохимическая оценка содержания селена в основных типах почв Тюменской области // Проблемы региональной экологии. 2021. № 3. С. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-3-32-38>. EDN: WVXXDU.
- Синдирева А. В., Майданюк Г. А. Экологическая оценка действия свинца в системе "почва – растение – животное" и разработка научно обоснованных приемов его детоксикации // Вестник КрасГАУ. 2018. № 6(141). С. 244–249. EDN: VPEPDD.
- Титов А. Ф., Казнина Н. М., Карапетян Т. А., Доршакова Н. В. [и др.]. Роль селена в жизнедеятельности растений, животных и человека // Успехи современной биологии. 2021. Т. 141, № 5. С. 443–456. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0042132421050094>. EDN: BSMCAA.
- Шеуджен А. Х., Аканова Н. И., Хурум Х. Д., Бондарева Т. Н. [и др.]. Селен в черноземе выщелоченном // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2018. № 138. С. 160–170. DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-138-041>. EDN: XOQEQQ.
- Шеуджен А. Х., Лебедевский И. А., Бондарева Т. Н. Биогеохимия и агрохимия селена // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 92. С. 781–798. EDN: RNEHAX.
- Шешнищан С. С., Шешнищан Т. Л., Капитальчук И. П. Марганец, цинк, медь, молибден и селен в системе "почва – растение" в долине Нижнего Днестра: ретроспектива и перспективы исследований // Успехи современной науки. 2017. Т. 2, № 10. С. 176–180. EDN: ZELBMV.
- El-Ramady H., Abdalla N., Alshaal T., Domokos-Szabolcsy E. [et al.]. Selenium in soils under climate change, implication for human health // Environmental Chemistry Letters. 2014. Vol. 13. P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-014-0480-4>.
- Kushwaha A., Goswami L., Lee J., Sonne K. [et al.]. Selenium in soil-microbe-plant systems: Sources, distribution, toxicity, tolerance, and detoxification // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2022. Vol. 52, Iss. 13. P. 2383–2420. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1883187>.
- Lopes G., Ávila F. W., Guilherme L. R. G. Selenium behavior in the soil environment and its implication for human health // Ciência e Agrotecnologia. 2017. Vol. 41, Iss. 6. P. 605–615. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542017416000517>.
- Qu L., Xu J., Dai Zh., Elyamine A. M. [et al.]. Selenium in soil-plant system: Transport, detoxification and bioremediation // Journal of Hazardous Materials. 2023. Vol. 452. Article number: 131272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131272>.
- Saha U., Fayiga A., Sonon L. Selenium in the soil-plant environment: A review // International Journal of Applied Agricultural Sciences. 2017. Vol. 3, Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ijaas.20170301.11>.

Semenova G. A., Fomina I. R., Kosobryukhov A. A., Lyubimov V. Yu. [et al.]. Mesophyll cell ultrastructure of wheat leaves etiolated by lead and selenium // *Journal of Plant Physiology*. 2017. Vol. 219. P. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.09.008>.

Tan J., Zhu W., Wang W., Li R. [et al.]. Selenium in soil and endemic diseases in China // *Science of the Total Environment*. 2002. Vol. 284, Iss. 1–3. P. 227–235. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00889-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00889-0).

References

- Belov, M. A., Becker, M. R., Sindireva, A. V., Shigabaeva, G. N. 2025. Assessment of the heavy metal content in soils and plants of the steppe and forest-steppe zones of the Chelyabinsk region. *Regional Geosystems*, 49(4), pp. 651–668. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-1. EDN: CJEZO. (In Russ.)
- Belov, M. A., Sindireva, A. V. 2024. Assessment of selenium content in the soil – plant system in the forest-steppe and steppe zone of the Chelyabinsk region. *Socialno-Ecologicheskie Technologii*, 14(4), pp. 496–511. DOI: <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2024-14-4-496-511>. EDN: CGWPBO. (In Russ.)
- Boev, V. A. 2013. Selenium in soils and agricultural crops of the south of the Tyumen region. *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*, 12, pp. 112–120. EDN: SEPHCD. (In Russ.)
- Bubnova, N. V., Timofeeva, N. Yu., Kostrova, O. Yu., Struchko, G. Yu. et al. 2023. The biological role of selenium (literature review). *Acta Medica Eurasica*, 2, pp. 114–123. DOI: <https://doi.org/10.47026/2413-4864-2023-2-114-123>. EDN: GPWVYW. (In Russ.)
- Vikhreva, V. A., Lebedeva, T. B., Nadezhkina, E. V. 2011. Accumulation of selenium by meadow-steppe and agricultural plants on leached chernozems of the forest-steppe of the Middle Volga region. *Eurasian Soil Science*, 7, pp. 63–70. EDN: NXRYFR. (In Russ.)
- Golubkina, N. A., Sindireva, A. V., Zaitsev, V. F. 2017. Intraregional variability of the selenium status of the population. *South of Russia: Ecology, Development*, 1, pp. 107–127. EDN: YIELCF. (In Russ.)
- Ermakov, V. V., Vorontsova, O. V. 2010. Biogeochemistry of selenium in soils. Materials of the VI–XII biogeochemical readings in memory of V. V. Kovalsky *Evolution of ideas in continental biogeochemistry and geochemical ecology (2006–2010)*. Moscow, pp. 268–287. (In Russ.)
- Kapitalchuk, I. P., Golubkina, N. A., Kapitalchuk, M. V. 2011. Selenium and its antagonists in the soil-plant biogeochemical chain in Transnistria. *Bulletin of the MSRU. Series: Natural Sciences*, 2, pp. 137–141. EDN: NRBERH. (In Russ.)
- Kozlova, G. G., Onina, S. A., Minina, N. N., Mikhailova, A. S. 2018. Determination of the content of selenium and heavy metals in plant raw materials and root soil. *Regional Environmental Issues*, 4, pp. 22–24. DOI: <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14022>. EDN: YNKQPJ. (In Russ.)
- Kozlova, G. G., Onina, S. A., Yakieva, M. N., Minina, N. N. et al. 2017. Determination of selenium and antagonist elements in soil and plant raw materials of the Birsky district of the Republic of Bashkortostan. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*, 3, pp. 150–157. (In Russ.)
- Pobilat, A. E., Voloshin, E. I. 2020. Features of selenium content in the soil-plant system (review). *Bulletin of KSAU*, 11(164), pp. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-11-98-105>. EDN: XGTTJW. (In Russ.)
- Semenova, N. A. 2025. Selenium – biofortification of agricultural crops. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 10–1(109), pp. 355–363. DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2025-10-1-355-363>. EDN: XZJBVW. (In Russ.)
- Seregina, I. I. 2022. Zinc, selenium and growth regulators in agrocenosis. Monograph. Moscow. (In Russ.)
- Sindireva, A. V., Kotchenko, S. G., Guryev, N. E. 2021. Geochemical assessment of selenium content in the main types of soils of the Tyumen region. *Problemy Regionalnoi Ekologii*, 3, pp. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-3-32-38>. EDN: WVXXDU. (In Russ.)
- Sindireva, A. V., Maidanyuk, G. A. 2018. Ecological assessment of the effect of lead in the soil – plant – animal system and the development of scientifically based methods for its detoxification. *Bulletin of KSAU*, 6(141), pp. 244–249. EDN: VPEPDD. (In Russ.)
- Titov, A. F., Kaznina, N. M., Karapetyan, T. A., Dorshakova, N. V. et al. 2021. The role of selenium in the vital activity of plants, animals and humans. *Biology Bulletin Reviews*, 141(5), pp. 443–456. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0042132421050094>. EDN: BSMCAA. (In Russ.)
- Sheujen, A. H., Akanova, N. I., Khurum, H. D., Osipov, M. A. et al. 2018. Selenium in leached chernozem. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 138, pp. 160–170. DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-138-041>. EDN: XOQEQX. (In Russ.)
- Sheujen, A. Kh., Lebedovskiy, I. A., Bondareva, T. N. 2013. Biogeochemistry and agrochemistry of selenium. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 92, pp. 781–798. EDN: RNEHAX. (In Russ.)
- Sheshnitsan, S. S., Sheshnitsan, T. L., Kapitalchuk, I. P. 2017. Manganese, zinc, copper, molybdenum and selenium in the soil – plant system in the Lower Dniester Valley: A retrospective and research prospects. *Uspekhi Sovremennoj Nauki*, 2(10), pp. 176–180. EDN: ZELBMV. (In Russ.)

- El-Ramady, H., Abdalla, N., Alshaal, T., Domokos-Szabolcsy, E. et al. 2014. Selenium in soils under climate change, implication for human health. *Environmental Chemistry Letters*, 13, pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-014-0480-4>.
- Kushwaha, A., Goswami, L., Lee, J., Sonne, K. et al. 2022. Selenium in soil-microbe-plant systems: Sources, distribution, toxicity, tolerance, and detoxification. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(13), pp. 2383–2420. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1883187>.
- Lopes, G., Ávila, F. W., Guilherme, L. R. G. 2017. Selenium behavior in the soil environment and its implication for human health. *Ciência e Agrotecnologia*, 41(6), pp. 605–615. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542017416000517>.
- Qu, L., Xu, J., Dai, Zh., Elyamine, A. M. et al. 2023. Selenium in soil-plant system: Transport, detoxification and bioremediation. *Journal of Hazardous Materials*, 452. Article number: 131272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131272>.
- Saha, U., Fayiga, A., Sonon, L. 2017. Selenium in the soil-plant environment: A review. *International Journal of Applied Agricultural Sciences*, 3(1). DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ijaas.20170301.11>.
- Semenova, G. A., Fomina, I. R., Kosobryukhov, A. A., Lyubimov, V. Yu. et al. 2017. Mesophyll cell ultrastructure of wheat leaves etiolated by lead and selenium. *Journal of Plant Physiology*, 219, pp. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.09.008>.
- Tan, J., Zhu, W., Wang, W., Li, R. et al. 2002. Selenium in soil and endemic diseases in China. *Science of The Total Environment*, 284(1–3), pp. 227–235. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00889-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00889-0).

Сведения об авторе

Белов Максим Александрович – ул. Володарского, 6, г. Тюмень, Россия, 625003;
Тюменский государственный университет, аспирант;
e-mail: m.blvv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4910-5671>

Maxim A. Belov – 6 Volodarskogo Str., Tumen, Russia, 625003;
Tyumen State University, PhD Student;
e-mail: m.blvv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4910-5671>