

Эколого-биогеохимическая оценка аккумуляции селена в растениях яровой пшеницы в условиях микровегетационного опыта

© 2025. А. В. Синдирева, д. б. н., зав. кафедрой,
М. Д. Айтбаев, магистрант, Н. Е. Гурьев, аспирант,
Тюменский государственный университет,
625002, Россия, г. Тюмень, ул. Осипенко, д. 2,
e-mail: a.v.sindireva@utmn.ru, stud0000227716@study.utmn.ru,
nikitka.gurev.1996@mail.ru

В статье представлены результаты по оценке действия селенита и селената натрия на начальные показатели роста и развития яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum*), выращенной на почвах, типичных для юга Тюменской области. Содержание селена в пшенице зависит от многих факторов: обеспеченности почв микроэлементами, их физико-химических свойств, форм и доз применяемого селена в качестве микроудобрения. Установлена прямая зависимость (коэффициенты корреляции от 0,88 до 0,99) между дозами вносимого удобрения и содержанием селена в почве. Наибольшее содержание селена при внесении селенита натрия отмечается при дозе 2 ПДК и составляет в среднем 12,3 мг/кг в темно-серой лесной почве, а при внесении селената натрия – в лугово-чернозёмной почве (среднее значение 20,0 мг/кг). Содержание селена в растениях в зависимости от доз и форм применяемого селена изменяется от 1,0 до 15,0 мг/кг. Отмечается сложный характер взаимодействия между селеном и кадмием, медью, никелем, свинцом, цинком, калием и фосфором, который зависит от ряда факторов: физиологических свойств элементов, формы применяемого селена, типа почв, на которой проращивали растения яровой мягкой пшеницы. Внесение селеносодержащих удобрений может оказать как благоприятный, так и угнетающий эффект, в зависимости от дозы и формы соединений селена. По показателям лабораторной всхожести, высоты ростков, массы сухого вещества яровой мягкой пшеницы установлена фитотоксичность почвы в условиях обогащения селенитом и селенатом натрия. При внесении селенита натрия отмечается стимулирующий эффект, при этом содержание селена в почве составляет от 0,5 до 12,3 мг/кг. Однако при применении селената натрия токсический эффект отмечается, начиная с содержания 1,15 мг/кг на темно-серой лесной почве, 1,73 мг/кг – на чернозёме выщелоченном и 3,7 мг/кг – на лугово-чернозёмной почве. Эффективность применения селеносодержащих удобрений под яровую мягкую пшеницу зависит от типа почв, формы соединений, дозы элемента.

Ключевые слова: селен, почвы, яровая мягкая пшеница, макро- и микроэлементы, Тюменская область.

Ecological and biogeochemical assessment of selenium accumulation in spring wheat plants under conditions of micro-vegetative experience

© 2025. A. V. Sindireva ORCID: 0000-0001-8596-7584,
M. D. Aitbayev ORCID: 0009-0000-0395-1408, N. E. Guryev ORCID: 0009-0004-0602-1969,
Tyumen State University,
2, Osipenko St., Tyumen, Russia, 625002,
e-mail: a.v.sindireva@utmn.ru, stud0000227716@study.utmn.ru,
nikitka.gurev.1996@mail.ru

The article presents the results of evaluating the sodium selenite/selenate effect on the initial growth and development of spring soft wheat (*Triticum aestivum*) on typical soils of the south Tyumen. The selenium content in wheat depends on many factors: soil physical and chemical properties, soil availability in trace elements, as well as compounds and doses of selenium applied as a microfertilizer. We establish a direct relationship (correlation coefficients from 0.88 to 0.99) between the applied fertilizer doses and the selenium content in the soil. The highest selenium content when applying sodium selenite is noted at 2 MPC Se dose and averages 12.3 mg/kg in dark gray forest soil, and when applying sodium selenate – in meadow chernozem (average value 20 mg/kg). The selenium content in plants varies from 1.0 to 15.0 mg/kg depending on the applied selenium doses and compounds. The complex nature of the interaction between selenium and cadmium, copper, nickel, lead, zinc, potassium and phosphorus is noted. It depends on a number of factors: the physiological properties of the elements, the form of selenium used, and the type of soil on which spring soft wheat plants were germinated. The application of selenium-containing fertilizers can have both a beneficial and depressing effect depending on the selenium compounds and dose.

A stimulating effect of sodium selenite application is noted, while the selenium content in the soil ranges from 0.5 to 12.3 mg/kg. However, when using sodium selenate, the toxic effect is noted starting with 1.15 mg/kg in dark gray forest soil, 1.73 mg/kg in leached chernozem, 3.7 mg/kg in meadow chernozem. The effectiveness of selenium-containing fertilizers application for spring soft wheat depends on the type of soil, the shape of the compounds, and the dose of the element.

Keywords: selenium, soils, spring soft wheat, macro- and microelements, Tyumen region.

Селен относится к первой группе эссенциальных микроэлементов, которые необходимы для живых организмов. Этот элемент входит в значительное количество белков, к которым относится, в частности, глутатионпероксидаза – фермент, участвующий в антиоксидантной защите животных и человека. При избыточном содержании селена отмечается его прооксидантное действие. Таким образом, избыток или недостаток селена в организме животных и человека оказывает негативное действие на их рост и развитие [1–5].

Содержание селена в живых организмах зависит от его концентрации в объектах окружающей среды. Так, аккумуляция селена в системе почва-растение-животное (человек) зависит от его количества и мобильности в почве. Содержание селена в почвах неоднородно и может находиться в интервале от 10 до 1000 мкг/кг и более в зависимости от типа почв, условий их формирования, а также геохимических особенностей территории [6–9].

Уровень селена в зональных почвах юга Тюменской области варьирует в интервале от 0,04 до 0,08 мг/кг, что позволяет их отнести к категории селенодефицитных. Это является причиной низкого содержания микроэлемента в растениях [10].

С учётом того, что территорию юга Тюменской области, как и многие регионы России и мира, можно отнести к категории селенодефицитной, необходима разработка ряда мероприятий, направленных на оптимизацию уровня селена на данной территории. Последнее может быть осуществлено за счёт производства функциональных продуктов питания с высоким содержанием селена, направленных на увеличение продолжительности жизни человека и снижение смертности [8, 10]. В этом отношении агрохимическая биофортификация селеном растений считается весьма выгодной [7]. Поскольку зерновые культуры играют важную роль в питании животных и человека, объектом исследования послужила яровая мягкая пшеница. Однако внедрение в сельскохозяйственную практику методов биофортификации требует большого количества экспериментальных исследований для установления оптимальных и, самое главное,

безопасных для природной среды и человека доз и форм селена.

Цель исследования – эколого-биогеохимическая оценка аккумуляции селена в яровой мягкой пшенице, выращенной на различных типах почв юга Тюменской области.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись почвы юга Тюменской области (чернозём выщелоченный, лугово-чернозёмная и тёмно-серая лесная почва) и растения яровой мягкой пшеницы сорта Памяти Азиева.

Для оценки в системе «почва – растение» аккумуляции и действия селена, внесённого в почву в различных дозах и соединениях, проведены в течение 2022–2023 гг. микровегетационные опыты в лаборатории экологического мониторинга Тюменского государственного университета по следующей схеме: контроль, 0,5 ПДК селена (5 мг/кг), 1 ПДК (10 мг/кг), 2 ПДК (20 мг/кг). Предельно допустимая концентрация для расчёта доз принята по [11]. Такие расчётные дозы вносимых элементов являются «опорной» точкой для моделирования действия химических элементов и для определения нормативов их действия для экологических и агрохимических целей. Селен вносили в виде селената и селенита натрия в различные почвы (чернозём выщелоченный, тёмно-серая лесная, лугово-чернозёмная почвы). Все опыты заложены в шестикратной повторности. На удобренной почве проращивали растения яровой мягкой пшеницы сорта Памяти Азиева в течение трёх недель в соответствии с требованиями к вегетационному опыту [12]. В течение эксперимента поддерживали оптимальные условия увлажнения почвы (60% от наименьшей влагоёмкости почвы), для опыта использовали пластиковые сосуды, искусственный дренаж. Масса почвы в каждом сосуде составляла 1 кг, микроудобрения (селенат и селенит натрия) вносили в виде сухих солей до посева, после их внесения осуществляли посев семян яровой мягкой пшеницы (двадцать семян на сосуд). По окончании исследования определяли показатели роста и развития яровой мягкой пшеницы: лабораторную всхожесть, массу растений,

содержание сухого вещества, высоту надземной части растений.

Для вегетационного опыта использовалась типичная почва агроландшафтов юга Тюменской области [13]. Участки отбора проб почв (слой 0–30 см) для эксперимента расположены на территории опытного поля ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья г. Тюмени общей площадью не менее 3,2 км². Было выделено 3 типа почв, информация о которых представлена в таблице 1. Отбор проб почв в границах одного опытного поля объясняется идентичностью геологического строения, экзогенных процессов на территории, условиями формирования почвенных горизонтов, а также факторов, оказывающих влияние на геохимические условия территории. По схеме физико-географического районирования юга Тюменской области территория исследования относится к Тавдинской провинции, Туринской подпровинции, Тюменского района лесной равнинной широтно-зональной области. Для данной территории характерна пестрота

почвенного покрова, что и объясняет различие в типах почв в пределах границ опытного участка [13].

Согласно данным таблицы 1, в исследуемых почвах не отмечено достоверного отличия в содержании гумуса, рН, калия. Все исследуемые почвы можно отнести к высоко гумусовым, по кислотности – близкие к нейтральным. Отмечены существенные отличия по содержанию нитрат-иона, фосфора и ряда микроэлементов. Наибольшее количество нитратного азота и подвижных форм фосфора отмечено в чернозёме выщелоченном. Содержание подвижных форм тяжёлых металлов во всех почвах не превышало установленных ПДК. Достоверных отличий по содержанию селена в почвах не отмечено. Содержание селена варьировало в диапазоне от 0,04 до 0,08 мг/кг, что классифицируется как очень низкое [14].

По результатам проведённого эксперимента по методике [15] установлена фитотоксичность исследуемых почв по показателям роста и развития яровой мягкой пшеницы.

Таблица 1 / Table 1

Агрохимическая характеристика почв, используемых в опыте
Agrochemical characteristics of soils used in the experiment

Показатели Indicators	Среднее содержание в почвах ±Δ, мг/кг Average content in soils ±Δ, mg/kg		
	лугово-чернозёмная meadow chernozem	чернозём выщелоченный leached chernozem	тёмно-серая лесная dark gray forest
Географические координаты участков отбора проб Geographical coordinates of sampling sites	N57°09'32,1233" E65°20'19,9568"	N57°09'36,0266" E65°20'40,4269"	N57°09'25,9109" E65°20'33,3972"
Органическое вещество, % Organic substance, %	13,0±1,3	12,2±1,3	10,0±1,0
рН _{ксл}	5,7±0,3	5,6±0,4	5,8±0,6
Селен, валовое содержание, мг/кг Selenium, gross content, mg/kg	0,05±0,01	0,04±0,01	0,08±0,01
Нитрат-ион, мг/кг Nitrate-ion, mg/kg	144±22	306±46	107±17
P ₂ O ₅ , подвижная форма, мг/кг P ₂ O ₅ , mobile form, mg/kg	112±22	267±53	65±13
K ₂ O, подвижная форма, мг/кг K ₂ O, mobile form, mg/kg	202±31	221±34	190±29
Кадмий, подвижная форма, мг/кг Cadmium, mobile form, mg/kg	0,034±0,004	0,040±0,003	0,030±0,008
Медь, подвижная форма, мг/кг Copper, mobile form, mg/kg	0,077±0,005	0,095±0,008	0,102±0,01
Никель, подвижная форма, мг/кг Nickel, mobile form, mg/kg	0,76±0,23	1,08±0,27	1,53±0,39
Свинец, подвижная форма, мг/кг Lead, mobile form, mg/kg	0,30±0,07	0,35±0,07	0,42±0,07
Цинк, подвижная форма, мг/кг Zinc, mobile form, mg/kg	0,86±0,11	1,05±0,27	0,86±0,11

Шкала токсичности почв / Soil toxicity scale

Величина ИТФ / ITF value	Класс токсичности / Toxicity class
>1,10	VI – стимуляция / VI – stimulation
0,91–1,10	V – норма / V – the norm
0,71–0,90	IV – низкая токсичность / IV – low toxicity
0,50–0,70	III – средняя токсичность / III – medium toxicity
<0,50	II – высокая токсичность / II – highly toxicity
Среда непригодна для жизни тест-объекта The environment is unsuitable for the test object life	I – сверхвысокая токсичность, вызывающая гибель тест-объекта / I – ultra-high toxicity, causing test-object' death

Примечание: ИТФ – индекс токсичности фактора.
Note: ITF – factor toxicity index.

Оценка фитотоксичности почв определялась по формуле:

$$ИТФ = ТФ_0 / ТФ_к, \quad (1)$$

где ИТФ – индекс токсичности фактора; ТФ₀ – среднее значение показателя в опыте; ТФ_к – среднее значение этого показателя в контроле.

Оценка полученных результатов проводилась по шкале токсичности почв (табл. 2) [15].

Определение содержания селена, макро- и микроэлементов в почвах и растениях проводили в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ «ЦЛАТИ по УФО» по Тюменской области методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

Оценка аккумуляции селена в системе «почва-растение» проводилась по коэффициенту биологического поглощения (K_0), который рассчитывается, как отношение содержания селена в золе растения к его содержанию в почве.

Статистическая обработка полученных результатов проводилась с помощью пакета программ Microsoft Excel, STATISTICA. При обработке полученного материала использованы следующие статистические показатели: определение средних величин, оценка достоверности различий по критерию Стьюдента; корреляционный анализ. Взаимосвязи между параметрами оценивали при помощи метода ранговых корреляций Спирмена. Коэффициенты корреляции оценивались следующим образом: менее 0,3 – слабая связь, от 0,3 до 0,5 – умеренная, от 0,5 до 0,7 – значительная, от 0,7 до 0,9 – сильная и более 0,9 – очень сильная. Во всех процедурах статистического анализа рассчитывали достигнутый уровень значимости (p), при этом критическим уровнем значимости принимали $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

На доступность растениям различных форм селена, содержащихся в почве, оказывает влияние множество факторов, а именно: вид и сорт растения, петрографический, минеральный, механический, химический состав почв, в первую очередь, уровень кислотности, количество органического вещества, полуторных оксидов [15–18].

На рисунке 1 представлены зависимости валового содержания селена в почвах от доз внесения селенита и селената натрия в почвы, характерные для юга Тюменской области.

Анализируя данные рисунка 1 и рассчитанные уравнения прямой зависимости между дозой селена в форме селената и селенита натрия и содержанием селена в исследуемых почвах, можно сделать вывод о том, что с повышением дозы внесения селена его валовое содержание увеличивается во всех типах почв. Коэффициент корреляции для обоих соединений селена во всех случаях находится в интервале от 0,88 до 0,99.

При этом валовое содержание селена в почве выше при применении селената, чем при внесении селенита натрия. Наибольшее содержание селена при внесении селенита натрия отмечается при дозе 2 ПДК и составляет в среднем 12,3 мг/кг в тёмно-серой лесной почве, а при внесении селената натрия – в лугово-чернозёмной почве (среднее значение 20,0 мг/кг).

Согласно классификации, предложенной в работе [14], исследуемые почвы по содержанию селена можно отнести к следующим категориям. Почва контрольного варианта – к категории селенодефицитной (менее 125 мкг/кг). При применении селенита натрия: почвы варианта 0,5 ПДК Se – оптимальное содержание (175–3000 мкг/кг), а почвы вариантов 1 ПДК Se и 2 ПДК Se относятся к категории избыточ-

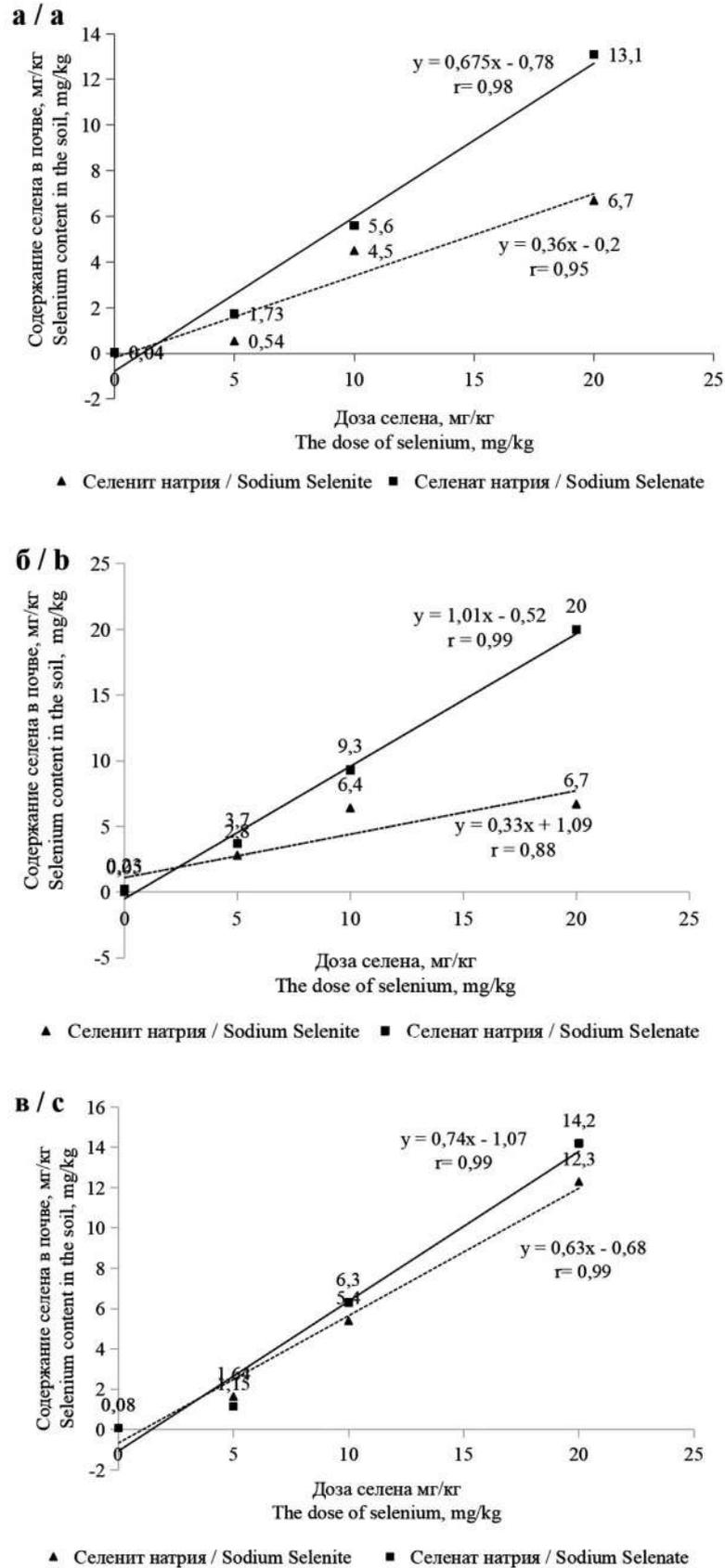


Рис. 1. Зависимость валового содержания селена от доз применения селенита и селената натрия в чернозёме выщелоченном (а), лугово-чернозёмной (б), тёмно-серой лесной почве (в)
Fig. 1. Dependence of gross selenium content on the doses of two forms of selenium compounds application in leached chernozem (a), meadow chernozem (b), dark gray forest soil (c)

ного (более 3000 мкг/кг). В почвах с применением селената натрия повышение уровня валового содержания селена до категории избыточного наблюдается уже при внесении дозы 0,5 ПДК Se.

Изучение взаимодействия макро- и микроэлементов с селеном в почве в зависимости от ландшафта, типа и подтипа почв и природных условий является актуальным и, в настоящее время, малоизученным направлением. Ряд авторов утверждает [17, 18,

20], что поступившие в почву микроэлементы способны влиять на мобильность других химических элементов. Возможно, это связано с образованием более прочных органоминеральных комплексов или, напротив, с их разрушением.

На рисунке 2 представлено изменение содержания подвижных форм макро- и микроэлементов в почвах юга Тюменской области на варианте с максимальной дозой селена 2 ПДК по сравнению с контролем.

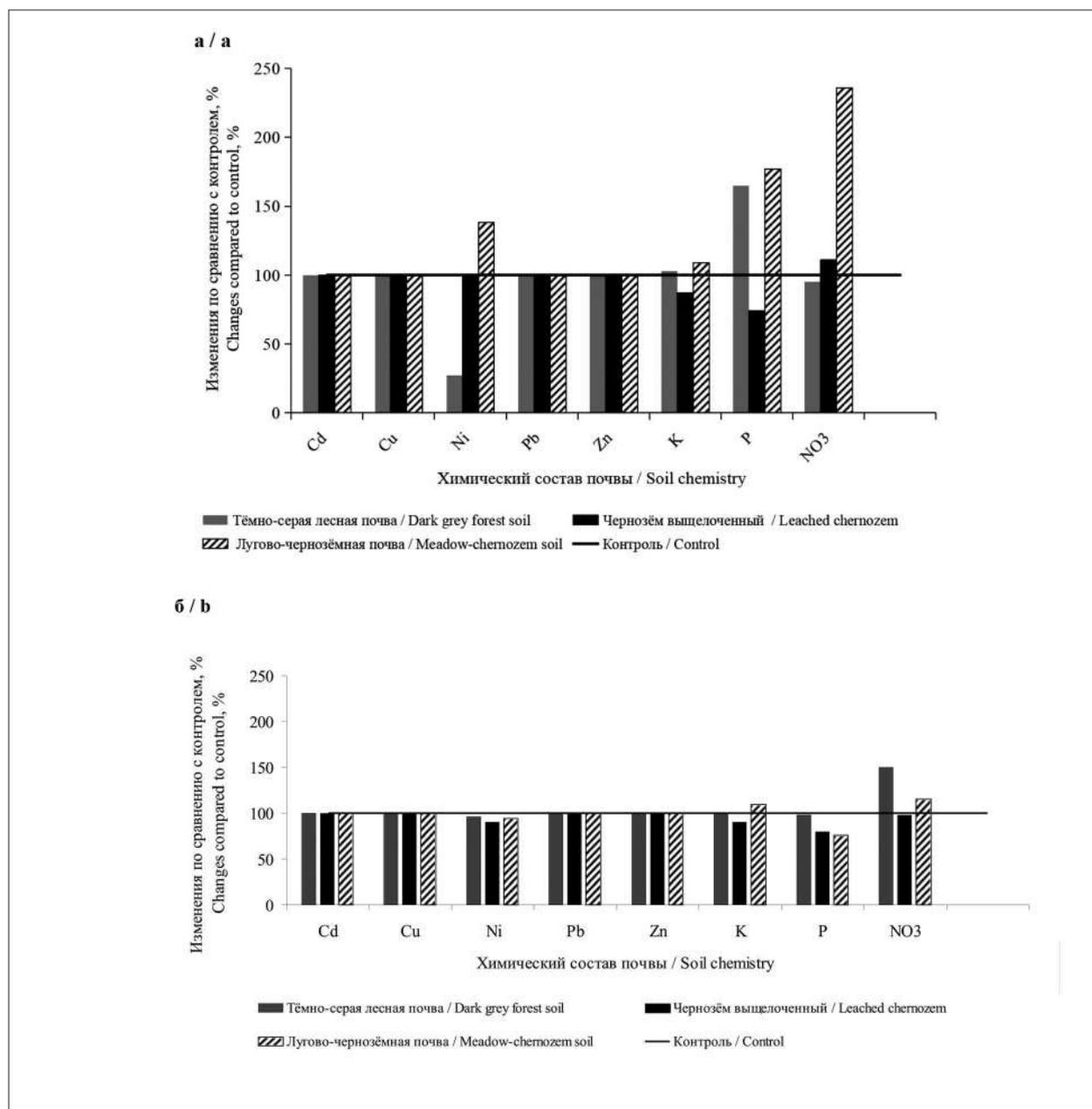


Рис. 2. Изменение содержания подвижных форм макро- и микроэлементов в исследуемых почвах при внесении селенита (а) и селената (б) натрия (доза селена 2 ПДК) по сравнению с контролем. Горизонтальной чертой на уровне 100% обозначен контрольный образец

Fig. 2. Changes in the mobile forms of macro- and microelements in the studied soils after sodium selenite (a) and sodium selenate (b) (2 MPC selenium) application compared to the control. The horizontal line at 100% indicates the control sample

Согласно представленным на рисунке 2 данным, применение селенита натрия способствовало как увеличению, так и снижению подвижности никеля. Наибольшее превышение по сравнению с контролем отмечается в лугово-чернозёмной почве, выше уровня контроля на 38% ($p \leq 0,05$); наименьшее – в тёмно-серой лесной почве, при этом содержание элемента составляет от уровня контроля всего 26,8% ($p \leq 0,05$). Среди макроэлементов при высоких дозах селенита изменяется уровень подвижного фосфора. При этом превышение по сравнению с контролем отмечается в опытах на лугово-чернозёмной и тёмно-серой лесной почвах, соответственно, на 77 и 65% ($p \leq 0,05$). Однако на чернозёме выщелоченном отмечается противоположный эффект – уровень подвижного фосфора снижается на 26% ($p \leq 0,05$). Отмечается тенденция к изменению содержания нитрат-иона во всех почвах, но достоверно ($p \leq 0,05$) – для лугово-чернозёмной почвы – на 136%.

Аналогичные закономерности отмечаются и при применении селената натрия (2 ПДК Se) – установлена тенденция к изменению содержания подвижных форм калия, фосфора, нитратов, никеля в почвах различного ряда (рис. 2). Наибольшее изменение уровня NO_3^- установлено в опытах на тёмно-серой лесной почве – увеличение на 43% ($p \leq 0,05$).

Таким образом, исследования показали, что при поступлении дополнительных количеств селена в почву наблюдаются явления антагонизма и синергизма между ионами, находящимися в почве, что, очевидно, объясняется рядом причин: ионообменными и окислительно-восстановительными реакциями, хелатообразованием, влиянием элемента на микробиоту [20].

Известно, что повышенное содержание селена в почве, как и его недостаток, в целом нежелательно для растений [7, 8, 19]. Поэтому представляет интерес изучение закономерностей аккумуляции микроэлемента в растениях в зависимости от разных факторов. Содержание химических элементов в растениях выше в начальные этапы онтогенеза, нежели в период физиологической спелости [8, 20].

На рисунке 3 представлено содержание селена в яровой мягкой пшенице в зависимости от дозы соединений микроэлемента, вносимых в различные почвы.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что аккумуляция селена в яровой мягкой пшенице зависит от типа почв, на которых выращивалась данная зерновая культура.

Наибольшее содержание селена ($14,8 \pm 0,5$ мг/кг) отмечается в яровой мягкой пшенице, выращенной на чернозёме выщелоченном при применении селенита с дозой селена 2 ПДК. Такое содержание микроэлемента в пшенице является самым высоким в условиях опыта.

В целом, можно сделать вывод о том, что во всех образцах, вне зависимости от типа почв и формы селена, наблюдается увеличение содержания данного микроэлемента в яровой мягкой пшенице. Установлена прямо пропорциональная зависимость между дозами селена, внесённого в виде селенита и селената натрия, и содержанием его в растениях, коэффициенты корреляции варьируют в интервале от 0,81 до 0,99 ($p \leq 0,05$). Исходя из рассчитанных уравнений зависимости, установлены нормативные коэффициенты b интенсивности действия селенита и селената натрия на накопление селена в растениях яровой мягкой пшеницы (табл. 3). Данный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$b = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sum x^2 - n\bar{x}^2} [20], \quad (2)$$

где b – коэффициент интенсивности действия селенита и селената натрия на накопление селена в растениях яровой мягкой пшеницы; y – содержание селена в растениях яровой пшеницы, мг/кг; x – доза химического элемента, мг/кг.

Величина коэффициента интенсивности действия селенита и селената натрия на накопление селена в растениях яровой мягкой пшеницы (b) показывает, насколько увеличивается содержание селена в растениях с повышением дозы внесённого микроэлемента в составе селенита и селената натрия на 1 мг/кг. Полученные данные (табл. 3) позволяют прогнозировать содержание селена в яровой мягкой пшенице на начальных этапах онтогенеза.

Одним из важных показателей, характеризующих аккумуляцию химического элемента в системе «почва – растение», является K_6 . По результатам исследования проведён расчёт K_6 селена растениями яровой мягкой пшеницы, выращенной на различных почвах (табл. 4).

Рассчитанные K_6 свидетельствуют о том, что с повышением содержания селена в почве способность растений поглощать микроэлемент значительно снижается, что, очевидно, свидетельствует о защитной реакции растений при высоких концентрациях микроэлемента в среде [8, 20].

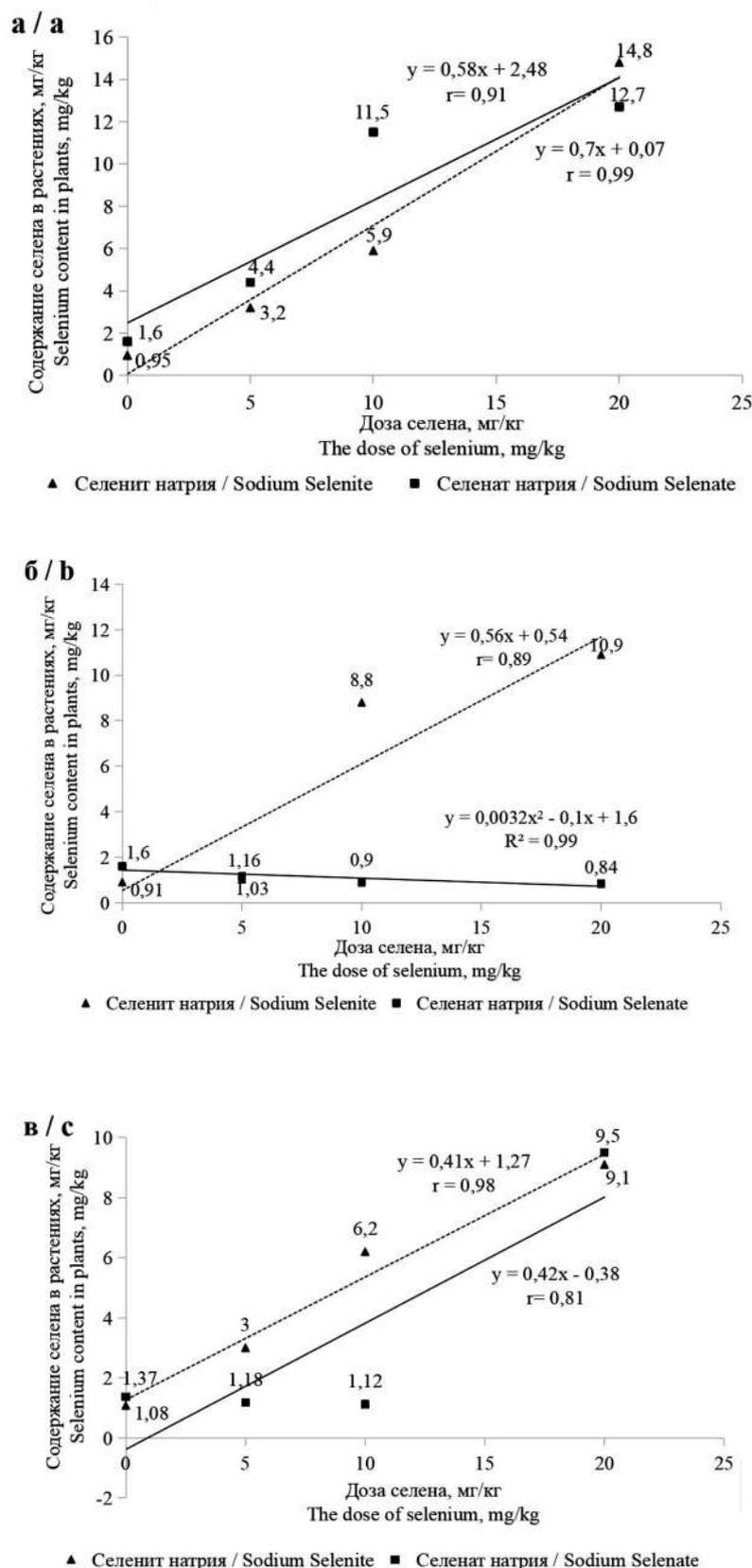


Рис. 3. Зависимость содержания селена в яровой мягкой пшенице от доз применения селенита и селената натрия в чернозёме выщелоченном (а), лугово-чернозёмной (б) и тёмно-серой лесной почве (в)
Fig. 3. Dependence of selenium content in spring soft wheat on the doses of two forms of selenium compounds application in leached chernozem (a), meadow chernozem (b) and dark gray forest soil (c)

Таблица 3 / Table 3

Коэффициенты интенсивности действия селенита и селената натрия на накопление селена в растениях яровой мягкой пшеницы, выращенной на различных типах почв (b)
Coefficients of intensity of action of selenite and sodium selenate on selenium accumulation in spring soft wheat plants on different soil types (b)

Соединения селена Selenium compounds	Коэффициент <i>b</i> в различных типах почв Coefficient "b" in different soil types		
	чернозём выщелоченный leached chernozem	лугово-чернозёмная meadow chernozem	тёмно-серая лесная dark gray forest soil
Na ₂ SeO ₃	0,70	0,56	0,41
Na ₂ SeO ₄	0,58	–	0,42

Примечание: прочерк обозначает, что коэффициент «b» невозможно рассчитать.
Note: the dash indicates that it is impossible to calculate the coefficient "b".

Таблица 4 / Table 4

Коэффициент биологического поглощения в зависимости от вносимой дозы селена на различных типах почв / Biological uptake coefficient depending on the applied dose of selenium in different soil types

Почва / Soil	Доза Se, мг/кг / Se dose, mg/kg			
	Контроль Control	5	10	20
Чернозём выщелоченный Leached chernozem	<u>32,5</u> 32,5	<u>5,92</u> 2,54	<u>1,3</u> 2,05	<u>2,20</u> 0,96
Лугово-чернозёмная Meadow chernozem	<u>9,28</u> 9,28	<u>0,36</u> 0,31	<u>1,37</u> 0,09	<u>1,62</u> 0,04
Тёмно-серая лесная Dark gray forest	<u>15,25</u> 15,25	<u>1,8</u> 1,02	<u>1,14</u> 0,1	<u>0,7</u> 0,6

Примечание: в числителе – для селенита, в знаменателе – для селената.
Note: the numerator is for selenite, the denominator is for selenate.

При оценке влияния микроэлементов на химический состав растений особое внимание необходимо уделять взаимодействию ионов при поступлении в растения. В ряде исследований указывается, что селен снижает содержание тяжёлых металлов, проявляющих токсическое действие в живых организмах при повышенных количествах [20, 21]. В связи с этим в процессе исследований мы особое внимание уделили влиянию селена на накопление других макро- и микроэлементов в растениях пшеницы. Результаты представлены на рисунке 4.

Согласно данным, представленным на рисунке 4, при внесении селенита натрия в лугово-чернозёмную почву отмечается достоверное ($p \leq 0,05$) увеличение содержания в растениях меди, цинка и калия, однако между селеном и кадмием, селеном и свинцом установлен антагонизм. Напротив, при выращивании пшеницы на чернозёме выщелоченном применение селенита способствовало увеличению содержания Cd, Pb ($p \leq 0,05$). В растениях, выращиваемых на тёмно-серой лесной почве, наблюдается повышение содержания изучаемых макро- и микроэлементов при обогащении селенитом натрия.

Характер взаимоотношения между ионами при поступлении в растения пшеницы отличается от указанных выше закономерностей при внесении селената натрия (рис. 4).

Интересно отметить, что в опытах на тёмно-серой лесной почве отмечается увеличение содержания изучаемых макро- и микроэлементов при внесении в почву селената натрия. Однако в опытах, проводимых на чернозёме выщелоченном, отмечаются противоположные закономерности. При выращивании пшеницы на лугово-чернозёмной почве установлена положительная связь между дозами вносимого селена в форме селената натрия и Cu, Pb, отрицательная – между селеном и Cd, Ni, K, P.

Таким образом, отмечается сложный характер взаимодействия между селеном и химическими элементами, который зависит от ряда факторов: физиологических свойств элементов, формы применяемого селена, типа почв, на которой проращивали растения яровой мягкой пшеницы [14, 16, 17]. В таблице 5 обобщены данные о взаимодействиях химических элементов в питании пшеницы на основе опытных данных.

Выявленные закономерности дают возможность оптимизировать поступление микроэлементов в растения с помощью использования разработанных нормативных параметров, и, тем самым, управлять процессом роста и развития, а в дальнейшем – формированием величины и качества урожая выращиваемых культур и установить градации и соотношения химических элементов в почве и растении с учётом агрономического и санитарно-гигиенического аспектов [20].

Для установления оптимальных и критических уровней селена в системе «почва –

растение» проанализированы показатели роста и развития яровой мягкой пшеницы в условиях вегетационного опыта. По показателям лабораторной всхожести, высоты ростков, массы сухого вещества яровой мягкой пшеницы установлена фитотоксичность почвы в условиях обогащения селенитом и селенатом натрия (табл. 6). Метод фитотестирования [15] позволяет установить нормативы предельно допустимых концентраций селена для конкретного типа почв в условиях территории юга Тюменской области.

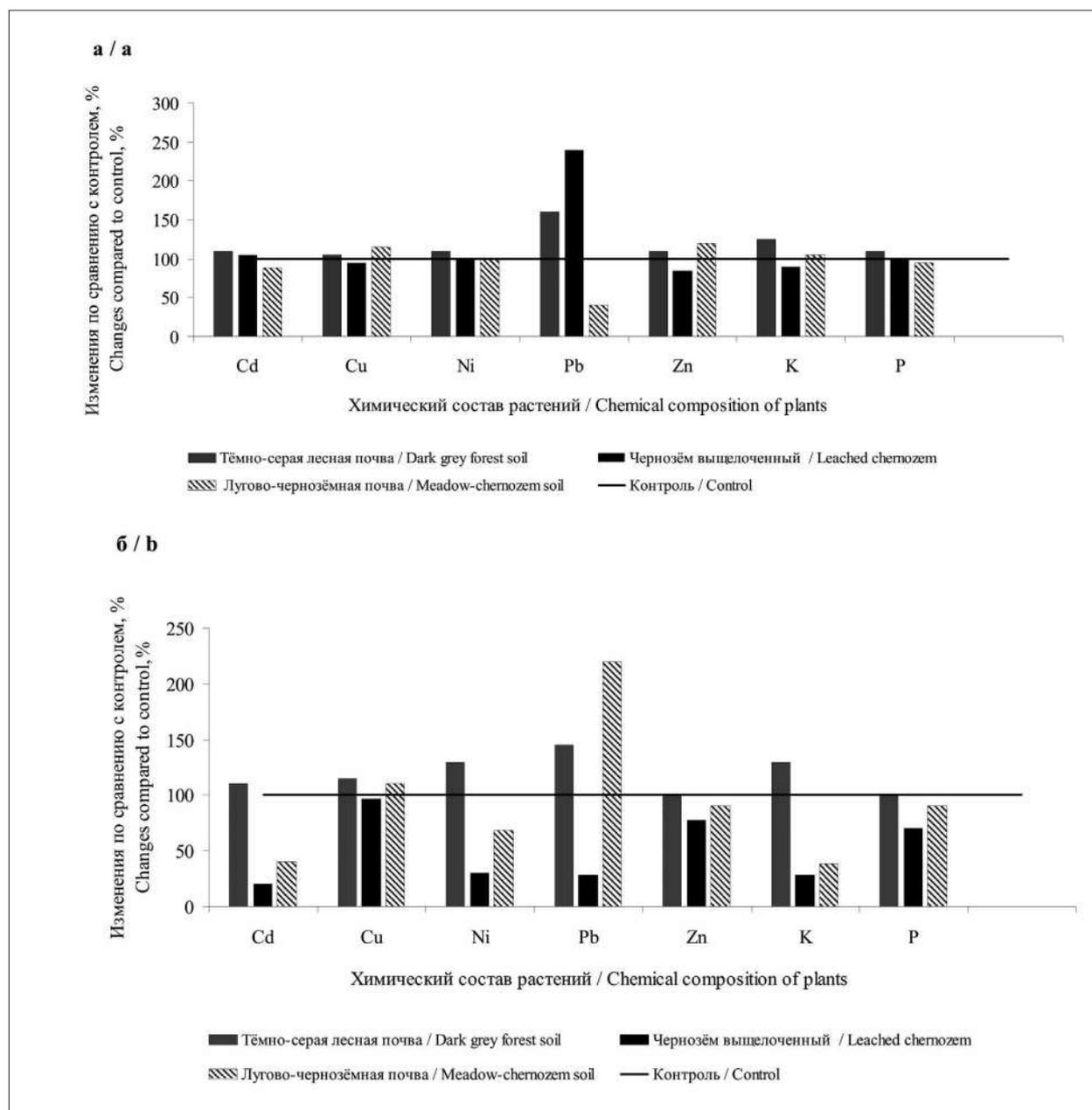


Рис. 4. Изменение содержания химических элементов в растениях яровой мягкой пшеницы при внесении селенита (а) и селената (б) натрия (доза селена 2 ПДК) в различные типы почв по сравнению с контролем
Fig. 4. Changes in the spring soft wheat plants chemical composition at application of sodium selenite (a) and sodium selenate (b) (2 MPC selenium) on different soil types in comparison with the control

Таблица 5 / Table 5

Характер взаимодействия между селеном и химическими элементами в растениях яровой мягкой пшеницы / The nature of the interaction between selenium and chemical elements in spring wheat plants

Соединения селена Selenium compounds	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	K	P
Чернозём выщелоченный / Leached chernozem							
Na ₂ SeO ₃	↑	–	–	↑	–	–	–
Na ₂ SeO ₄	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Лугово-чернозёмная / Meadow chernozem							
Na ₂ SeO ₃	↓	↑	–	↓	↑	↑	–
Na ₂ SeO ₄	↓	↑	↓	↑	–	↓	↓
Тёмно-серая лесная / Dark gray forest							
Na ₂ SeO ₃	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Na ₂ SeO ₄	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Примечание: ↓ – антагонизм между ионами, ↑ – синергизм между ионами, прочерк – зависимости нет.
Note: ↓ – antagonism between ions, ↑ – synergism between ions, a dash – no dependence.

Таблица 6 / Table 6

Индекс токсичности почв, обогащённых селеном, по показателям роста и развития яровой мягкой пшеницы
Toxicity index of soils enriched with selenium in terms of growth and development of spring soft wheat

Тип почвы Soil type	Доза селена, мг/кг Selenium dose, mg/kg	Среднее валовое содержание Se в почве, мг/кг Average gross Se content in soil, mg/kg	Индекс (ИТФ) / класс токсичности фактора по показателям / Index (ITF) / class of toxicity factor as measured by		
			лабораторной всхожести laboratory germination	высоты растений plant height	массы сухого вещества dry weight
Селенит натрия / Sodium selenite					
Чернозём выщелоченный Leached chernozem	5	0,54	0,85 / IV*	1,04/V	0,91 / V
	10	4,5	0,77 / IV	1,08/V	1 / V
	20	6,7	0,97 / V	1,02/V	1,08 / V
Лугово-чернозёмная Meadow chernozem	5	2,8	1,02 / V	1,01/V	1 / V
	10	6,4	1,02 / V	1,14/VI	1,16 / VI
	20	6,7	1,11 / VI	1,10/V	1,33 / VI
Тёмно-серая лесная Dark gray forest soil	5	1,64	1 / V	1,05/V	1,23 / VI
	10	5,4	0,84 / IV	1,01 / V	1,23 / VI
	20	12,3	1,05 / V	1,10 / V	1,23 / VI
Селенат натрия / Sodium selenate					
Чернозём выщелоченный Leached chernozem	5	1,73	0,91 / V	0,59 / III	0,83 / IV
	10	5,6	1,08 / V	0,34 / II	0,83 / IV
	20	13,1	1,05 / V	0,27 / II	0,75 / IV
Лугово-чернозёмная Meadow chernozem	5	3,7	1,11 / VI	0,52 / II	1,08 / V
	10	9,3	1,25 / VI	0,36 / II	0,91 / V
	20	20	1,15 / VI	0,24 / II	0,75 / IV
Тёмно-серая лесная Dark gray forest soil	5	1,15	1,15 / VI	0,48 / II	1 / V
	10	6,3	1,02 / V	0,33 / II	0,8 / IV
	20	14,2	1,05 / V	0,27 / II	0,69 / III

Примечание: * классы токсичности: I – сверхвысокая, II – высокая, III – средняя, IV – низкая, V – норма, VI – стимуляция.

Note: * toxicity classes: I – ultra-high, II – high, III – medium, IV – low, V – normal, VI – stimulation.

Согласно обобщённым данным таблицы 6, наблюдается неоднозначный эффект от применения селена с позиции рассчитанного индекса токсичности. Биометрические параметры растений по-разному свидетельствуют о токсичности микроэлемента. На сегодняшний день необходимость селена для растений не доказана. В ряде работ показано, что применение селенсодержащих удобрений способствует стимулированию процессов роста, развития растений [7, 8]. Таким образом, можно сделать прогноз о влиянии разных форм и доз селена на показатели роста и развития растений и, тем самым, выявить оптимальное и токсическое содержание селена в системе «почва – растение» на начальном этапе онтогенеза растений. Однако окончательный вывод об эффективности применения селенсодержащих удобрений можно сделать на основе данных об урожайности культурных растений.

Заключение

Исследования, посвящённые эколого-биогеохимической оценке аккумуляции селена в яровой мягкой пшенице, выращенной на почвах различного типа юга Тюменской области, позволили установить:

1. Внесение селена в виде селената и селенита натрия в дозах от 5 до 20 мг/кг способствует увеличению его валового содержания во всех типах почв. Селен наиболее интенсивно накапливается при применении селената натрия в лугово-чернозёмной почве: от 0,08 мг/кг (в контроле) до 20 мг/кг (при внесении дозы 20 мг/кг).

2. Содержание селена в растениях пшеницы в зависимости от доз и форм применяемого Se составляет от 1 до 15 мг/кг. Установлена прямо пропорциональная зависимость между дозами Se, внесённого в форме селенита и селената натрия, и содержанием селена в растениях, коэффициенты корреляции варьируют в интервале от 0,81 до 0,99 ($p \leq 0,05$).

3. Отмечается сложный характер взаимодействия между селеном и изученными химическими элементами (Cd, K, Cu, Ni, Pb, Zn, P) в почве и растениях, который зависит от ряда факторов: физиологических свойств элементов, формы применяемого селена, типа почв, на которой проращивали растения яровой мягкой пшеницы.

4. Внесение селенсодержащих удобрений может оказать как благоприятный, так и угнетающий эффект, в зависимости от формы и дозы соединений селена. При внесении селенита натрия отмечается стимулирующий

эффект, при этом содержание селена в почве составляет от 0,5 до 12,3 мг/кг. Однако при применении селената натрия токсический эффект отмечается начиная с содержания 1,15 мг/кг на тёмно-серой лесной почве, 1,73 мг/кг на чернозёме выщелоченном, 3,7 мг/кг на лугово-чернозёмной почве.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-55-44028.

Литература

1. Авцын А.А., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека. М.: Медицина, 1991. 496 с.
2. Manojlović M., Lončarić Z. Selenium deficiency in regional soils affecting animal and human health in Balkan and other European countries // The nexus of soils, plants, animals and human health / Eds. B.R. Singh, M.J. McLaughlin, E.C. Brevik. Stuttgart: Catena-Schweizerbart, 2017. V. 7. P. 87–98. doi: 10.1016/j.envint.2017.12.035
3. Tangjaidee P., Swedlund P., Xiang J., Yin H., Quek S.Y. Selenium-enriched plant foods: selenium accumulation, speciation, and health functionality // Front. Nutr. 2023. V. 9. Article No. 962312. doi: 10.3389/fnut.2022.962312
4. Genchi G., Lauria G., Catalano A., Sinicropi M.S., Carocci A. Biological activity of selenium and its impact on human health // Int. J. Mol. Sci. 2023. V. 24. No. 3. Article No. 2633. doi: 10.3390/ijms24032633
5. Pham-Huy L.A., He H., Pham-Huy C. Free radicals, antioxidants in disease and health // Int. J. Biomed. Sci. 2008. V. 4. No. 2. P. 89–96.
6. Bügel S., Larsen E.H., Sloth J.J., Flytlie K., Overvad K., Steenberg L.C., Moesgaard S. Absorption, excretion, and retention of selenium from a high selenium yeast in men with a high intake of selenium // Food Nutr. Res. 2008. V. 52. Article No. 1642. doi: 10.3402/fnr.v52i0.1642
7. Голубкина Н.А., Папазян Т.Т. Селен в питании. Растения, животные, человек. М.: Печатный город, 2006. 250 с.
8. Голубкина Н.А., Полуобяринов П.А., Синдирева А.В. Селен в продуктах растительного происхождения // Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 2. С. 63–69.
9. Синдирева А.В., Голубкина Н.А. Оценка селенового статуса территории Омской области // Омский научный вестник. 2011. № 1 (104). С. 192–196.
10. 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: 10.24412/1728-323X-2021-3-32-38
11. Kloke A. Richtwerte'80. Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturböden // Mitt. VDLUFA. 1980. V. 2. No. 3. P. 9–11.

12. Юдин Ф.А. Методика агрохимических исследований. М.: Колос, 1980. 363 с.

13. Каретин Л.Н. Почвы Тюменской области. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 286 с.

14. Tan J., Zhu W., Wang W., Li R., Hou S., Wang D., Yang L. Selenium in soil and endemic diseases in China // *Sci. Total Environ.* 2002. V. 284. No. 1–3. P. 227–235. doi: 10.1016/s0048-9697(01)00889-0

15. Минеев В.Г., Ремпе Е.Х., Воронина Л.П., Коваленко Л.В. Определение суммарной токсичности почвы, корневой системы и конечной продукции при применении химических средств защиты растений: методика и результаты // *Вестник сельскохозяйственной науки.* 1991. № 6. С. 63–71.

16. Капитальчук М.В., Капитальчук И.П., Голубкина Н.А. Аккумуляция и миграция селена в компонентах биогеохимической цепи «почва – растения – человек» в условиях Молдавии // *Поволжский экологический журнал.* 2011. № 3. С. 323–335.

17. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 277 с.

18. Ермаков В.В., Ковальский В.В. Биологическое значение селена. М.: Наука, 1974. 300 с.

19. Debnath S., Agarwal A., Kumar N.R., Bedi A. Selenium-based drug development for antioxidant and anticancer activity // *Future Pharmacol.* 2022. V. 2. No. 4. P. 595–607. doi: 10.3390/futurepharmacol2040036

20. Синдирева А.В. Локальные биогеохимические циклы микроэлементов в агроэкосистемах Западной Сибири // *Геохимия.* 2023. № 68. № 10. С. 1045–1058. doi: 10.31857/S0016752523100126

21. Скугорева С.Г., Ашихмина Т.Я., Фокина А.И., Лялина Е.И. Химические основы токсического действия тяжёлых металлов (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология.* 2016. № 1. С. 4–13. doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-014-013

References

1. Avtsyn A.A., Zhavoronkov A.A., Rish M.A., Strokova L.S. Human microelementoses. Moskva: Meditsina, 1991. 496 p. (in Russian).

2. Manojlović M., Lončarić Z. Selenium deficiency in regional soils affecting animal and human health in Balkan and other European countries // *The nexus of soils, plants, animals and human health* / Eds. B.R. Singh, M.J. McLaughlin, E.C. Brevik. Stuttgart: Catena-Schweizerbart, 2017. V. 7. P. 87–98. doi: 10.1016/j.envint.2017.12.035

3. Tangjaidee P., Swedlund P., Xiang J., Yin H., Quek S.Y. Selenium-enriched plant foods: selenium accumulation, speciation, and health functionality // *Front. Nutr.* 2023. V. 9. Article No. 962312. doi: 10.3389/fnut.2022.962312

4. Genchi G., Lauria G., Catalano A., Sinicropi M.S., Carocci A. Biological activity of selenium and its impact on human health // *Int. J. Mol. Sci.* 2023. V. 24. No. 3. Article No. 2633. doi: 10.3390/ijms24032633

5. Pham-Huy L.A., He H., Pham-Huy C. Free radicals, antioxidants in disease and health // *Int. J. Biomed. Sci.* 2008. V. 4. No. 2. P. 89–96.

6. Bügel S., Larsen E.H., Sloth J.J., Flytjie K., Overvad K., Steenberg L.C., Moesgaard S. Absorption, excretion, and retention of selenium from a high selenium yeast in men with a high intake of selenium // *Food Nutr. Res.* 2008. V. 52. Article No. 1642. doi: 10.3402/fnr.v52i0.1642

7. Golubkina N.A., Papazyan T.T. Selenium in nutrition. Plants, animals, humans. Moskva: Pechatnyy gorod, 2006. 250 p. (in Russian).

8. Golubkina N.A., Poluboyarinov P.A., Sindireva A.V. Selenium in food crops // *Voprosy pitaniya.* 2017. V. 86. No. 2. P. 63–69 (in Russian).

9. Sindireva A.V., Golubkina N.A. Evaluation of selenium status of the territory of Omsk region // *Omsk Scientific Bulletin.* 2011. No. 1 (104). P. 192–196 (in Russian).

10. Sindireva A.V., Kotchenko S.G., Guriev N.E. Geochemical assessment of selenium content in the main types of soils of the Tyumen region // *Problemy regional'noj ekologii.* 2021. No. 3. P. 32–38 (in Russian). doi: 10.24412/1728-323X-2021-3-32-38

11. Kloke A. Richtwerte'80. Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturböden // *Mitt. VDLUFA.* 1980. V. 2. No. 3. P. 9–11.

12. Yudin F.A. Methods of agrochemical research. Moskva: Kolos, 1980. 363 p. (in Russian).

13. Karetin L.N. Soils of Tyumen region. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1990. 286 p. (in Russian).

14. Tan J., Zhu W., Wang W., Li R., Hou S., Wang D., Yang L. Selenium in soil and endemic diseases in China // *Sci. Total Environ.* 2002. V. 284. No. 1–3. P. 227–235. doi: 10.1016/s0048-9697(01)00889-0

15. Mineev V.G., Rempe E.H., Voronina L.P., Kovalenko L.V. Determination of total toxicity of soil, root system and final products during application of chemical plant protection products: methodology and results // *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki.* 1991. No. 6. P. 63–71 (in Russian).

16. Kapitalchuk M.V., Kapitalchuk I.P., Golubkina N.A. selenium Accumulation and migration in components of the biogeochemical soil – plants – man food chain in Moldova // *Povolzhskiy Journal of Ecology.* 2011. No. 3. P. 323–335 (in Russian).

17. Syso A.I. Regularities of chemical elements distribution in soil-forming rocks and soils of Western Siberia. Novosibirsk: Izdatelstvo SO RAN, 2007. 277 p. (in Russian).

18. Ermakov V.V., Kovalskiy V.V. Selenium biological significance. Moskva: Nauka, 1974. 300 p. (in Russian).

19. Debnath S., Agarwal A., Kumar N.R., Bedi A. Selenium-based drug development for antioxidant and anticancer activity // *Future Pharmacol.* 2022. V. 2. No. 4. P. 595–607. doi: 10.3390/futurepharmacol2040036

20. Sindireva A.V. Local biogeochemical cycles of trace elements in agroecosystems of Western Siberia // *Geochemistry.* 2023. V. 68. No. 10. P. 1045–1058 (in Russian). doi: 10.31857/S0016752523100126

21. Skugoreva S.G., Ashihmina T.Ya., Fokina A.I., Lyalina E.I. Chemical grounds of toxic effect of heavy metals (review) // *Theoretical and Applied Ecology.* 2016. No. 1. P. 4–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-014-013