

Экологический инжиниринг в агроэкосистемах: обогащение селеном яровой мягкой пшеницы в условиях Севера Монголии

Анна Синдирева^{1*}, Эрдэнээ Эрдэнэцогт², Анна Мангутова¹, Виктория Иеронова¹, Радмир Косолапов¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет», Школа естественных наук, Тюмень, Россия; a.v.sindireva@utmn.ru; a.k.mangutova@utmn.ru; stud0000265202@study.utmn.ru

²Национальный Центр Общественного Здоровья Монголии, Улан-Батор, Монголия; erd625@yahoo.com

*Корреспонденция: a.v.sindireva@utmn.ru

Аннотация. В статье впервые представлен комплексный анализ влияния микроэлементов селена и йода на рост и развитие яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum L.*) в условиях северных регионов Монголии. В ходе полевых опытов изучалось действие различных форм микроэлементов — селенита натрия, селената натрия и йодида калия на биометрические параметры растений и урожайность культуры. Результаты показали дифференцированный ответ растений на применение различных соединений и дозировок. Применение селенита натрия, а также совместное действие селената натрия и йодида калия способствует увеличению урожайности зерна яровой пшеницы, за счет увеличения плотности растений, несмотря на снижение индивидуальной продуктивности колоса. Впервые в конкретных агроэкологических условиях для растений пшеницы установлена сильная корреляция между концентрацией селена в растворах для некорневой обработки и его содержанием в зерне ($r = 0,99$). При этом использование селената натрия обеспечивало более интенсивное накопление микроэлемента (коэффициент $b = 80,23$) по сравнению с селенитом ($b = 44,94$). При максимальной концентрации раствора селената натрия (0,01%) содержание селена в зерне увеличивалось в 6,4 раза относительно контроля. Экологический анализ результатов позволяет рассматривать селеновую и йодную биофортификацию как инновационную биотехнологию, направленную на оптимизацию продуктивности агроэкосистем без чрезмерной химической нагрузки. Такие методы укрепляют концепцию «зелёного земледелия», способствуют сохранению плодородия почв и снижению экологического риска, связанного с применением синтетических удобрений. Важным аспектом является интеграция полученных данных в стратегию устойчивого развития сельского хозяйства северных регионов Монголии, поскольку биофортификация зерновых культур микроэлементами повышает экологическую устойчивость агроландшафтов и способствует разработке мероприятий по коррекции микроэлементозов у человека и животных.

Цитирование: Синдирева, А., Эрдэнэцогт, Э., Мангутова, А., Иеронова, В., Косолапов, Р. (2025). Экологический инжиниринг в агроэкосистемах: обогащение селеном яровой мягкой пшеницы в условиях Севера Монголии. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 152(3), 222-233. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-222-233>

Академический редактор:
Ж.Г. Берденов

Поступила: 09.09.2025
Исправлена: 22.09.2025
Принята: 23.09.2025
Опубликована: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Таким образом, результаты исследования демонстрируют значимость биофортификации как инструмента экологического инжиниринга, позволяющего объединить задачи повышения урожайности, улучшения качества продукции и сохранения природной среды.

Ключевые слова: биофортификация; яровая пшеница; селен (Se); йод (I); некорневые подкормки

1. Введение

Проблема недостатка доступных для растений микроэлементов в почве, является довольно распространенной среди многих агроценозов мира, что может негативно повлиять на урожайность и качество сельскохозяйственных культур. Кроме того, недостаток элементов в системе почва-растение является одной из причин микроэлементозов человека. Известно, что микроэлементы играют большую роль в жизни человека (Aleksandrovskaaya, 2016; Vano, 2021). Среди проблем недостатка микроэлементов в системе почва-растение-животное (человек) особо выделяется дефицит йода и селена (Danso, 2023; Erdenotsogt, 2023). Роль этих элементов в растениях недостаточно изучена, однако невысокое содержание этих микроэлементов в растениеводческой продукции может негативно отразиться на здоровье человека и животных. Среди сельскохозяйственных культур с позиции обеспеченности йодом и селеном особое внимание заслуживают зерновые культуры, которые занимают значительное место в рационе животных и человека.

В связи с этим, необходимы исследования в области разработки оптимальных приемов обогащения зерновых культур йодом и селеном и оценка возможности оптимизации селенового и йодного статуса населения при использовании обогащенных растений. При этом анализ возможности применения данных микроэлементов должен осуществляться, как с агрономической, так и с санитарно-гигиенической позиций. Следует отметить, действие селена и йода в системе почва-растение во многих регионах активно изучается (Erdenotsogt, 2023; Golubkina, 2017; Golubkina, 2022; Golubkina, 2024).

Йод и селен используются в репродукции тиреотропных гормонов, которые стимулируют функции всех желез внутренней секреции. Входя в состав активного центра трийодтиронин деиодиназ, селен активно участвует в метаболизме йода, являясь его синергистом. Эти элементы определяют уровень иммунной защиты организма, оптимизируют рост, работу мозга и репродуктивных органов, предупреждают возникновение и развитие кардиологических и ряда онкологических заболеваний. Одновременная недостаточность селена и йода приводит к значительному усугублению последствий их дефицита (Golubkina и др., 2024). До настоящего времени решение этой проблемы осуществлялось независимо для селена и йода (Golubkina, 2024; Gupta, 2017).

В первом случае использовали селеносодержащие премиксы в кормах сельскохозяйственных животных и птицы, селеносодержащие БАДы и селеносодержащие удобрения. Также в ряде работ изучалось действие селена на человека и животных с позиции его взаимодействия с другими элементами (Kapitalchuk, 2023).

Решение проблемы йододефицита осуществлялось в основном путем применения йодированной соли и в меньшей степени йодсодержащих БАД. Тем не менее, по мнению ряда авторов, использование йодированной соли не является достаточно эффективным для оптимизации обеспеченности йодом населения. Кроме того, избыточное потребление соли может вызвать ряд негативных последствий для организма человека (Glagoleva, 2025).

Также доказано и токсическое действие неорганических соединений селена (Samynathan, 2023).

Поэтому представляет интерес возможность обогащения селеном и йодом растениеводческой продукции, поскольку это дает возможность ввести в рацион животных и человека не опасные неорганические соединения, а перевести их в безопасную и доступную

органическую форму (Sheshnitsan, 2024). Кроме того, известно, что обогащение микроэлементами положительно влияет на качество растений (Sindireva, 2022).

Таким образом, широко распространенные дефициты йода и селена среди населения мира и, в частности, в Монголии, а также неразрывная биологическая связь этих элементов-синергистов определяют перспективность получения функциональных продуктов питания на основе как отдельного, так и одновременного обогащения сельскохозяйственных культур йодом и селеном с целью оптимизации йодного и селенового статуса населения, снижения оксидантного стресса у населения и защиты от негативных факторов окружающей среды (Sindireva, 2023; Sindireva и др., 2024; Sindireva, 2025; Skrypnik, 2024; Tallarita, 2025).

Цель работы – агроэкологическая оценка отдельного и совместного применения селени и йодсодержащих удобрений под яровую мягкую пшеницу в условиях Севера Монголии.

Данные исследования в агроэкологических условиях Севера Монголии проведены впервые.

2. Материалы и методы

Исследования по оценке эффективности применения селена и йода для обогащения яровой мягкой пшеницы сорта Дархан-193 проводили на опытном поле селекционного участка Института растениеводства и сельского хозяйства (г. Дархан) в 2022–2023 гг. (2022 полевые опыты, 2023 лабораторные исследования). Почва опытного участка темно-каштановая, содержание гумуса в среднем составляло 1,16%, рН вод. – 7,2, содержание нитратного азота, подвижных форм фосфора и калия характеризуется как низкое. Исходное содержание селена в почве не превышало 0,08 мг/кг, что характеризуется как довольно низкое.

Климатические условия г. Дархан носят резко континентальный характер. В летний период могут наблюдаться незначительные кратковременные осадки, температура воздуха не более +25 °С. Зимой температура воздуха опускается до –25 °С, снега здесь практически нет. В целом в г. Дархане солнечных дней в году наблюдается более 250.

Характеристика метеоусловий мая-августа 2022 года. Весенне-летний период характеризовался постепенным нарастанием температурного режима с засушливым маем (средняя температура +11.8°С, осадки всего 14.2 мм) и поздними заморозками до –4.8°С. Июнь отмечался умеренно теплой погодой (+17.4°С) с увеличением влажности до 58% и осадками 43.6 мм. Пик летнего сезона пришелся на июль с максимальной средней температурой +20.2°С, обильными дождями (95.8 мм) и высокой влажностью 72%, когда был зафиксирован абсолютный максимум +33.1°С. Август характеризовался началом температурного спада до +18.1°С при сохранении значительной увлажненности (68.3 мм осадков) и появлением первых заморозков в конце месяца (+0.9°С).

Опыты проводили в трехкратной повторности. Опыты мелкоделяночные, площадь одной делянки 1 м², повторность трехкратная, расположение вариантов систематическое. Схема опыта: 1) Контроль; 2) 0,005% раствор селенита натрия; 3) 0,01% раствор селенита натрия; 4) 0,005% раствор селената натрия; 5) 0,01% раствор селената натрия; 6) 0,005% раствор иодида калия; 7) 0,01%, раствор иодида калия; 8) 0,005%, раствор селенита натрия +0,005% раствор иодида калия; 9) 0,005% раствор селената натрия +0,005% раствор иодида калия.

Микроэлементы применяли методом путем некорневой обработки (опрыскивания) однократно перед фазой колошения. На каждое растение расходовалось 30 мл раствора, соответственно на делянку расход препарата составлял в зависимости от количества растений от 4,5 до 5,5 литров. Закладку опытов с микроудобрениями, все учеты, наблюдения и отбор растительных и почвенных образцов проводили по общепринятым методикам. Агротехника в опыте была общепринятой для условий зоны. Наблюдения в опыте: фаза колошения, полной спелости. Отбирали растения с каждой делянки для проведения биометрических измерений по следующим показателям: высота растений, количество растений на 1 м², длина колоса, масса семян на 1 м², масса зерен одного колоса, количество зерен в колосе яровой пшеницы. В статье представлены данные биометрических показателей яровой мягкой пшеницы в уборку

(фаза полной спелости). Уборку проводили в первой декаде сентября 2022 года. Учет урожайности осуществляли прямым поделяночным взвешиванием.

Содержание селена и тяжелых металлов в почве и растительных образцах определяли в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ «ЦЛАТИ по УФО» по Тюменской области методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в соответствии с методическими рекомендациями ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98 («Количественный химический анализ почв», 2005).

По окончании исследования полученные данные подвергали статистической обработке. Для статистической обработки данных использовали стандартные пакеты компьютерных программ Microsoft Office Excel 2007 и STATISTICA 6.0.

3. Результаты

Комплексное воздействие микроэлементов на рост и развитие яровой мягкой пшеницы оценивалось как в период вегетации, так и на стадии уборки урожая. Морфометрический анализ показал, что обработка исследуемыми соединениями оказала неоднозначное действие на изменение параметров роста и развития в большинстве опытных вариантов (Таблица 1, Рисунки 1 и 2).

Таблица 1. Показатели роста сорта яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дархан-193 под влиянием препаратов селена и йода (M±SEM)

№	Вариант опыта	Высота растений, см	Количество растений, шт.	Длина колоса, см
1	Контроль	91,33±0,88	158,67±9,62	9,80±0,20
2	0,005% Na ₂ SeO ₃	84,67±2,40	184,67±4,67	9,37±0,20
3	0,01% Na ₂ SeO ₃	84,00±1,00**	186,67±29,28	9,27±0,14
4	0,005% Na ₂ SeO ₄	85,67±1,46*	186,67±22,81	9,30±0,12
5	0,01% Na ₂ SeO ₄	84,33±0,66**	149,33±9,34	9,33±0,18
6	0,005% KI	82,67±0,69**	117,33±11,40	9,17±0,41
7	0,01% KI	83,67±0,88**	152,00±29,52	9,03±0,26
8	0,005% Na ₂ SeO ₃ +0,005% KI	85,00±2,52	141,33±22,69	9,50±0,31
9	0,005% Na ₂ SeO ₄ +0,005% KI	90,33±2,37	180,00±14,43	9,47±0,22*

Примечание: * Различия с контролем статистически значимы по t-критерию Стьюдента при $p < 0,05$.; ** - Различия с контролем статистически значимы по t-критерию Стьюдента при $p < 0,05$.

По сравнению с контролем высота растений в опытных вариантах в большинстве случаев достоверно снижалась. Самые низкие показатели высоты растений отмечались при внесении растворов KI в концентрациях 0,005% и 0,01%.

Обработка растений пшеницы изучаемыми препаратами привела к незначительному снижению длины колоса. Минимальное значение отмечено в опытном варианте с 0,01% раствором KI и составило 9,03±0,26 см (контроль - 9,80±0,20 см). Количество растений на делянке в сравнении с контрольным вариантом (среднее значение 158,67±9,62 шт.) варьировало как в сторону увеличения при использовании 0,005 и 0,01% растворов Na₂SeO₃, так и в сторону уменьшения значений параметра (при обработке растений растворами KI).

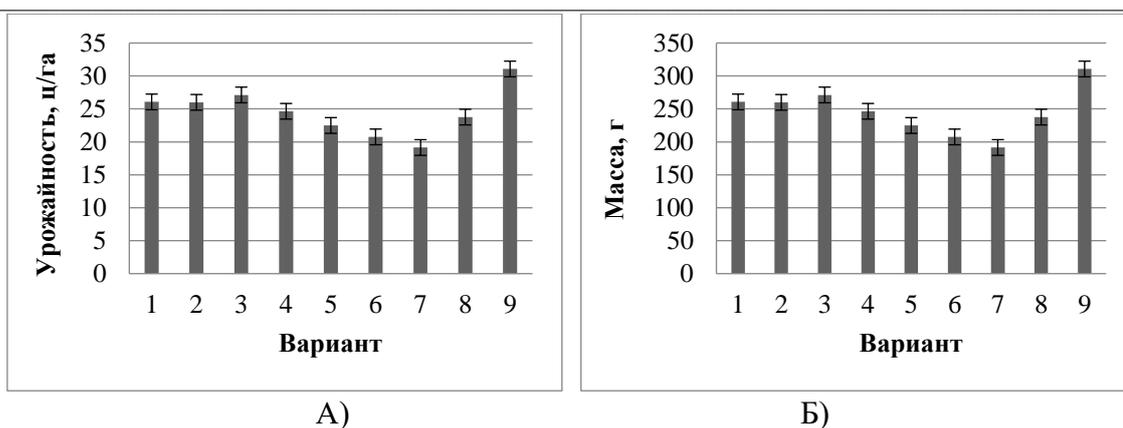


Рисунок 1. Показатели А) урожайности зерна Б) массы зерна яровой пшеницы сорта Дархан-193 на 1 м²

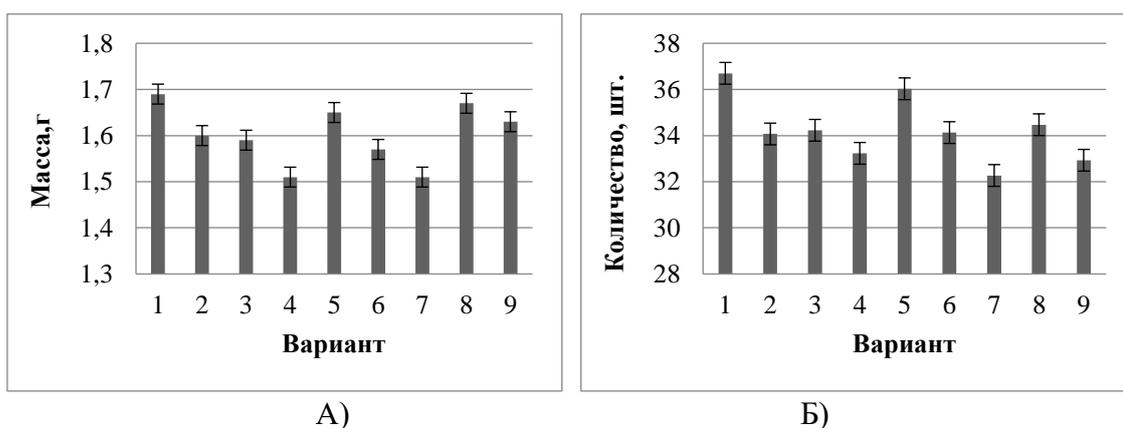


Рисунок 2. Показатели А) массы зерен одного колоса Б) количество зерен в колосе яровой пшеницы сорта Дархан-193

Примечание 1 – контроль; 2 – 0,005 % Na₂SeO₃; 3 - 0,01 % Na₂SeO₃; 4 - 0,005 % Na₂SeO₄; 5 - 0,01 % Na₂SeO₄; 6 – 0,005 % KI; 7 - 0,01 % KI; 8 - 0,005 % Na₂SeO₃+0,005 % KI; 9 - 0,005 % Na₂SeO₄+0,005% KI

Обработка селенитом натрия способствовала проявлению наиболее выраженных положительных эффектов среди всех исследуемых соединений. Несмотря на наблюдаемое снижение массы зерна в одном колосе и их количества, масса семян и общая урожайность либо поддерживались на уровне контроля (0,005% Na₂SeO₃), либо отмечалось увеличение (0,01% Na₂SeO₃) по сравнению с контролем. Данное явление, по-видимому, коррелировало с повышенной плотностью растений на единицу площади, компенсируя снижение индивидуальных параметров растений.

Напротив, растворы йодида калия и селената натрия не оказали благоприятного воздействия ни на развитие растений, ни на параметры урожайности. Применение йодида калия привело к постоянному снижению всех измеряемых параметров при применении микроудобрения в обеих исследуемых дозах. Хотя обработка 0,005% раствором селената натрия способствовала увеличению количества растений на единицу площади, это не привело к повышению урожайности, в отличие от результатов в опыте с применением селенита натрия. Однако совместное применение этих соединений способствовало увеличению показателей роста и развития по сравнению с вариантом 0,005% Na₂SeO₃ + 0,005% KI.

Накопление микроэлементов в пищевых продуктах растительного происхождения происходит в зависимости от вида почвы, ее физических свойств и химического состава, географического расположения района, климатических условий, вида, сорта и стадии вегетации растений, применяемых удобрений и других факторов (Erdenotsogt, 2023). В связи с возможным негативным влиянием избыточных количеств селена, поступивших с

растительной пищей в живой организм, возникает необходимость проводить контроль питания растения по химическому анализу (Wang, 2022). Данные о содержании селена в зерне яровой пшеницы при опрыскивании культуры соединениями селена и йода в различных концентрациях представлены на Рисунке 3.

На всех вариантах с обработкой препаратов отмечалось повышенное содержание селена по сравнению с контролем. Применение селената натрия привело к наиболее интенсивному аккумулярованию селена, при этом наивысшая концентрация (0,01%) привела к 6,4-кратному увеличению содержания селена в зерне по сравнению с контролем, и составляла 0,96 мг/кг.

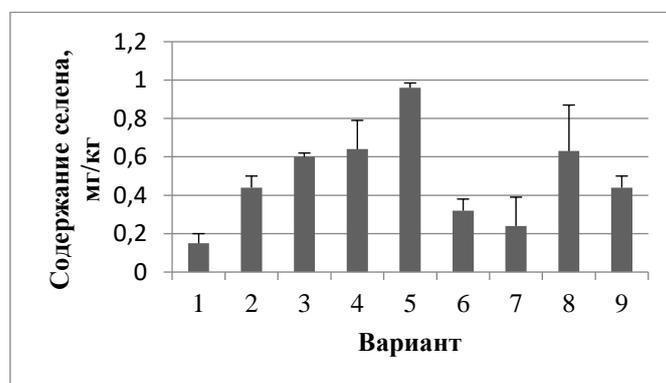


Рисунок 3. Содержание селена в зерне яровой мягкой пшеницы сорта Дархан-193

Примечание 1 – контроль; 2 – 0,005 % Na_2SeO_3 ; 3 – 0,01% Na_2SeO_3 ; 4 – 0,005 % Na_2SeO_4 ; 5 – 0,01 % Na_2SeO_4 ; 6 – 0,005 % KI; 7 – 0,01 % KI; 8 – 0,005 % Na_2SeO_3 +0,005 % KI; 9 – 0,005 % Na_2SeO_4 +0,005 % KI

Установлены прямые линейные зависимости между дозами селена в растворах селенита и селената:

- Селенит: $y_1 = 44,94x_1 + 0,14$, $r = 0,99$ (Уравнение 1)

- Селенат: $y_2 = 80,23x_2 + 0,18$, $r = 0,99$ (Уравнение 2)

где y_1 , y_2 - содержание селена в зерне яровой пшеницы (мг/кг), а x_1 , x_2 - концентрации селена в растворе при некорневой обработке (%).

Полевые исследования позволили рассчитать нормативные коэффициенты интенсивности (b) действия селена в темно-каштановой почве, указывающие на изменения содержания в зерне яровой пшеницы. Эти коэффициенты демонстрируют увеличение содержания селена на 1% увеличения концентрации микроэлемента в растворе: $b = 44,94$ для селенита натрия и $b = 80,23$ для селената натрия.

Одновременное применение селена и йода способствовало значительным изменениям содержания селена в зерне яровой мягкой пшеницы.

В целом исследования по изучению особенностей накопления селена в зерне яровой мягкой пшеницы позволили выявить следующие закономерности:

- накопление селена зависит от способа его применения;
- при различных способах его внесения существует прямая зависимость концентрации селена в растениях от дозы поступления (Yerzhanova и др., 2025; Zharkova, 2020).

В полевых условиях при питании растений возникают сложные взаимосвязи между ионами макро- и микроэлементов, обусловленные взаимодействием не только между двумя, но и большим количеством ионов. Эти взаимосвязи осложняются почвенными условиями и применением удобрений, оказывающими влияние на изменение состава почвенного раствора. Познание взаимосвязей очень важно для разработки диагностики питания растений, в том числе при применении микроудобрений.

Нашими исследованиями установлено влияние некорневого внесения йода и селена на содержание микроэлементов, определяемых при агроэкологическом мониторинге.

Одним из существенных показателей качества растениеводческой продукции, свидетельствующий об ее экологической безопасности, является элементный химический состав, в частности, содержание тяжелых металлов.

В наших исследованиях изучено взаимодействие селена с микроэлементами при поступлении в растения яровой пшеницы в условиях севера Монголии.

Исследования показали, что характер взаимоотношений при поступлении их в растения во многом определяется биологическими особенностями растений, физико-химическими свойствами селен-содержащих препаратов, применяемых в качестве микроудобрений. При опрыскивании раствором селенита натрия с концентрацией Se 0,01% содержание кадмия снижается в зерне пшеницы на 38% ($P < 0,05$), в то же время при применении селената натрия с аналогичной дозой Se содержание кадмия в зерне увеличивается в среднем на 32% ($P < 0,05$). Таким образом, отмечаются как явления антагонизма, так и синергизма в паре селен-кадмий. Отмечены положительные взаимосвязи в паре селен-цинк, селен-медь. Например, при некорневом поступлении раствора селенита натрия с концентрацией Se 0,01% содержание цинка в зерне пшеницы увеличивается на 16% ($P < 0,05$), меди – на 28,9% ($P < 0,05$).

Взаимодействие селена и никеля, селена и свинца в условиях проведенных исследований характеризуется проявлением антагонизма. Так, при применении селена в дозе 0,01% содержание свинца снижается в среднем на 75 и 78% ($P < 0,05$) соответственно для селенита и селената натрия.

Таким образом, чтобы судить о характере взаимоотношений ионов в растениях, следует знать фактически сложившийся баланс элементов питания внутри растительного организма. Установленные нами зависимости поступления одних элементов от содержания других можно использовать для прогноза влияния микроэлементов (в частности, селена) на химический состав растений и формирование продукционного процесса.

4. Обсуждение

Острая потребность различных стран мира в ликвидации полимикрэлементозов делает исследования возможностей сочетанной биофортификации сельскохозяйственных растений I и Se приоритетными, поскольку именно такой подход может обеспечить недорогой и высокоэффективный способ улучшения I и Se статуса и улучшения здоровья населения. Исследования показали, что совместное применение микроэлементов под яровую мягкую пшеницу в оптимальных дозах положительно сказывается на росте и развитии растений. В то же время при поступлении микроэлементов в почву в исследуемых дозах может возникнуть экологическая проблема, связанная с избыточным накоплением ряда химических элементов и, в первую очередь селена и йода, в системе почва-растение-животное. Поэтому с целью обеспечения экологической безопасности при разработке технологии биофортификации необходимо проводить агроэкологический мониторинг и оценку влияния метода обогащения растений на пищевую ценность получаемого продукта.

Данное исследование выявляет несколько закономерностей относительно биофортификации селеном и йодом яровой мягкой пшеницы. Наибольшая эффективность селенита натрия в части обогащения селеном над другими соединениями микроэлемента согласуется с установленной литературой о биодоступности селена и механизмах поглощения растениями.

Неодинаковая эффективность применения селенита и селената отражает их различные метаболические пути и механизмы клеточного поглощения. Повышенный коэффициент интенсивности действия для селената ($b = 80,23$) по сравнению с селенитом ($b = 44,94$) указывает на более эффективную транслокацию и аккумуляцию в зерне, что объясняется большей подвижностью селената в сосудистых системах растений.

Негативные эффекты, наблюдаемые при обработке йодидом калия, могут отражать фитотоксические реакции при применяемых концентрациях, что указывает на необходимость оптимизации применения йода в качестве микроэлемента. Эффекты взаимодействия между соединениями селена и йода указывают на потенциальные синергические или

антагонистические отношения, которые могут значительно влиять на стратегии биофортификации.

Установленные линейные зависимости и прогностические модели предоставляют ценные инструменты для применения в точном земледелии, позволяя планировать целенаправленное обогащение селеном и йодом при сохранении агрономических показателей. Однако сложные взаимодействия, наблюдаемые между различными микроэлементами, подчеркивают необходимость комплексной оценки подходов к биофортификации несколькими элементами.

Полученные результаты подтверждают возможность применения агрохимического метода, в частности, некорневой обработки селеном, для решения проблемы дефицита микронутриентов, одновременно подчеркивая необходимость выбора соединений, приемов, доз применения для достижения оптимальных результатов.

Также необходимо отметить, что на качество растениеводческой продукции, в частности, в условиях применения микроэлементов в качестве удобрений, значительно влияют взаимосвязи ионов при поступлении их в растительный организм. Как правило, взаимосвязи между элементами питания, в частности, микроэлементами в растениях можно объяснить взаимодействием ионов с биологически активными молекулами, например, ферментативными системами. Особый интерес представляет взаимодействие селена и тяжелых металлов, поскольку это очень важно с позиции экологической безопасности. Как правило, такие взаимосвязи в литературе описываются как антагонизм. Однако исследования показывают, что могут проявляться как явления антагонизма, так и синергизма в зависимости от условий. В наших исследованиях установлены положительные взаимосвязи между селеном и цинком, медью, а отрицательные зависимости между селеном и никелем, свинцом. Неоднозначные взаимосвязи установлены между селеном и кадмием. Очевидно, что характер взаимосвязей при поступлении в растительный организм может зависеть от многих факторов: фазы развития растений, формы, дозы и пути поступления дополнительных количеств микроэлемента в растения. Изучение таких механизмов – довольно трудная задача, но она имеет очень большое значение в практической агроэкологии, агрохимии, а также ветеринарии и медицины, поскольку данный фактор может значительно повлиять на качество кормов.

5. Заключение

Острая потребность различных стран мира в ликвидации полимикроэлементозов делает исследования возможностей как отдельной, так и сочетанной биофортификации сельскохозяйственных растений I и Se довольно перспективными методами, поскольку именно такой подход может обеспечить недорогой и высокоэффективный способ улучшения I и Se статуса и улучшения здоровья населения. Исследования показали, что как отдельное, так и комбинированное внесение микроэлементов под яровую мягкую пшеницу в оптимальных дозах может положительно сказываться на росте и развитии растений. Однако несбалансированное применение микроудобрений в повышенных дозировках может негативно сказаться как на биометрических показателях растений в процессе онтогенеза, так и на снижении продуктивности, урожайности и качества в период физиологической зрелости.

К тому же при поступлении микроэлементов в почву в высоких дозах может возникнуть экологическая проблема, связанная с избыточным накоплением ряда химических элементов, например, селена и йода, в системе почва-растение-животное.

Изучено взаимодействие селена и тяжелых металлов. Установлены положительные взаимосвязи между селеном и цинком, медью, а отрицательные зависимости между селеном и никелем, свинцом. Неоднозначные взаимосвязи установлены между селеном и кадмием. Очевидно, что характер взаимосвязей при поступлении в растительный организм может зависеть от многих факторов: фазы развития растений, формы, дозы и пути поступления дополнительных количеств микроэлемента в растения.

Поэтому с целью обеспечения экологической безопасности при разработке технологии биофортификации необходимо проводить агроэкологический мониторинг и оценку влияния метода обогащения растений на пищевую ценность получаемого продукта.

6. Вспомогательный материал: отсутствует.

7. Вклады авторов

Концептуализация - А.С., Э.Э.; методология - А.С.; программное обеспечение - А.М. В.И.; валидация - А.М., Р.К.; формальный анализ - А.С., А.М., В.И., Р.К.; исследование - Э.Э.; ресурсы - А.С., Э.Э.; курирование данных - А.С.; написание-подготовка оригинального черновика - А.С.; написание-рецензирование и редактирование - А.С., А.М., Р.К.; визуализация - Р.К.; руководство - А.С.; администрирование проекта - А.С.; получение финансирования - А.С. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Синдирева, Анна – д.б.н., заведующая кафедрой геоэкологии и природопользования ШЕН, ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, Россия, 625003; email: a.v.sindireva@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8596-7584>

Эрдэнэцогт, Эрдэнээ - научный консультант, Национальный Центр Общественного Здоровья Монголии, Улан-Батор, Монголия; email: erd625@yahoo.com, <https://orcid.org/0009-0005-6856-0594>

Мангутова, Анна - ассистент кафедры геоэкологии и природопользования ШЕН, ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, Россия, 625003; email: a.k.mangutova@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6489-2069>

Иеронова, Виктория - доцент кафедры геоэкологии и природопользования ШЕН, ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, Россия, 625003; email: v.v.ieronova@utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5404-709X>

Косолапов, Радмир - магистрант кафедры геоэкологии и природопользования ШЕН, ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, Россия, 625003; email: stud0000265202@study.utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5581-9717>

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

10. Благодарности: отсутствует.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Aleksandrovskaaya, E.Yu., Sindireva, A.V., Golubkina, N.A., Chuyanova, G.I. (2016). Vliyanie selena na urozhaynost' i pokazateli kachestva zerna yarovoy myagkoy pshenitsy v usloviyakh yuzhnoy lesostepi omskoy oblasti [The influence of selenium on yield and grain quality indicators of spring soft wheat in the conditions of the southern forest-steppe of the Omsk region]. *Biologicheskie nauki*, 96.
2. Bano, I., Skalickova, S., Sajjad, H., Skladanka, J., Horkey, P. (2021). Uses of selenium nanoparticles in the plant production. *Agronomy*, 11(11), 2229. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112229>
3. Yerzhanova, A., Baranovskaya, N., Khussainov, A., Zhumay, Y., Sarsembin, U., Niyazova, A., Akhmetzhan, A. (2025). Statistical indicators of the concentration of chemical elements in biological tissues in the Akmola region. *International Journal of Environmental Impacts*, 8(3), 501–510.

4. Danso, O.P., Asante-Badu, B., Zhang, Z., Song, J., Wang, Z., Yin, X., Zhu, R. (2023). Selenium biofortification: Strategies, progress and challenges. *Agriculture*, 13(2), 416. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020416>
5. Erdenotsogt, E., Sindireva, A.V. (2023). Otsenka effektivnosti primeneniya selensoderzhashchikh udobreniy dlya obogashcheniya yarovoy myagkoy pshenitsy v tselyakh korrektsii selenovogo statusa naseleniya Mongolii [Assessment of the effectiveness of selenium-containing fertilizers for spring wheat enrichment to correct selenium status of the population of Mongolia]. *Voprosy pitaniya*, 92(S5), 268–269.
6. Glagoleva, O.N., Vilms, E.A., Turchaninov, D.V., Turchaninova, M.S., Menshchikova, Yu.V., Brusentsova, A.V. (2025). Gigienicheskaya otsenka potrebleniya pishchevoy soli vzroslym naseleniem Omskoy oblasti: dannye epidemiologicheskogo monitoringa (2006–2023 gg.) [Hygienic assessment of dietary salt consumption by adult population of Omsk region: Epidemiological monitoring data (2006–2023)].
7. Golubkina, N.A., Poluboyarinov, P.A., Sindireva, A.V. (2017). Selen v produktakh rastitel'nogo proiskhozhdeniya [Selenium in plant-derived products]. *Voprosy pitaniya*, 86(2), 63–69.
8. Golubkina, N.A., Sindireva, A.V., Zaytsev, V.F. (2017). Vnutriregional'naya variabel'nost' selenovogo statusa naseleniya [Intraregional variability of selenium status of the population]. *Yug Rossii: Ekologiya, razvitie*, 12(1), 107–127.
9. Golubkina, N., Kharchenko, V., Caruso, G. (2022). Selenium: Prospects of functional food production with high antioxidant activity. In Reference Series in Phytochemistry, 149–175. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95510-7_6
10. Golubkina, N., Amagova, Z., Kharchenko, V., Bogachuk, M., Makarenko, M., Paleeva, M., Malinkin, A., Andreeva, K., Kavarnakaeva, Z., Matsadze, V., Murariu, O.C., Caruso, G. (2024). Effect of foliar selenate supplementation on biochemical characteristics of purslane weed (*Portulaca oleracea* L.). *Horticulturae*, 10(7), 708. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10070708>
11. Golubkina, N., Kharchenko, V., Moldovan, A., Antoshkina, M., Ushakova, O., Şekara, A., Stoleru, V., Murariu, O.C., Tallarita, A.V., Sannino, M., Caruso, G. (2024). Effect of selenium and garlic extract treatments of seed-addressed lettuce plants on biofortification level, seed productivity and mature plant yield and quality. *Plants*, 13(9), 1190. <https://doi.org/10.3390/plants13091190>
12. Golubkina, N., Sheshnitsan, S., Koshevarov, A., Pirogov, N., Plotnikova, U., Tallarita, A.V., Murariu, O.C., Merlino, L., Caruso, G. (2024). Peculiarities of plant mineral composition in semi-desert conditions. *International Journal of Plant Biology*, 15(4), 1229–1249. <https://doi.org/10.3390/ijpb15040089>
13. Gupta, M., Gupta, S. (2017). An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2074. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>
14. Kapitalchuk, M.V., Golubkina, N.A., Kapitalchuk, I.P. (2023). Soderzhanie selena v volosakh naseleniya Respubliki Moldova [Selenium content in hair of the population of the Republic of Moldova]. *Ekologiya cheloveka*, 5, 363–373. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2023-5-363-373>
15. Kolbert, Z., Lehotai, N., Molnár, Á., Feigl, G. (2016). “The roots” of selenium toxicity: A new concept. *Plant Signaling & Behavior*, 11(10), e1241935. <https://doi.org/10.1080/15592324.2016.1241935>
16. Samynathan, R., Venkidasamy, B., Ramya, K., Muthuramalingam, P., Shin, H., Kumari, P.S., Thangavel, S., Sivanesan, I. (2023). A recent update on the impact of nano-selenium on plant growth, metabolism, and stress tolerance. *Plants*, 12(4), 853. <https://doi.org/10.3390/plants12040853>
17. Sheshnitsan, S., Golubkina, N., Sheshnitsan, T., Murariu, O.C., Tallarita, A.V., Caruso, G. (2024). Selenium and heavy metals in soil–plant system in a hydrogeochemical province with high selenium content in groundwater: A case study of the lower Dniester valley. *Soil Systems*, 8(1), 7. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010007>

18. Sindireva, A., Zayko, O., Astashov, V., Borodina, I., Guseva, E., Zaytseva, P. (2022). Analysis of the complete blood count in male Wistar rats exposed to different doses of orally administered sodium selenite. *Archiv EuroMedica*, 12, 15–16.
19. Sindireva, A., Golubkina, N., Bezuglova, H., Fedotov, M., Alpatov, A., Erdenotsogt, E., Şekara, A., Murariu, O.C., Caruso, G. (2023). Effects of high doses of selenate, selenite and nano-selenium on biometrical characteristics, yield and biofortification levels of *Vicia faba* L. cultivars. *Plants*, 12(15), 2847. <https://doi.org/10.3390/plants12152847>
20. Sindireva, A.V., Erdenetsogt, E., Golubkina, N.A., Guryev, N.E. (2024). Integral'nyy podkhod k normirovaniyu deystviya selena v sisteme pochva–rasteniye–zhivotnoe dlya razrabotki nauchno-obosnovannoy profilaktiki mikroelementozov v regionakh Rossii i Mongolii [An integrated approach to standardizing selenium action in the soil-plant-animal system for developing scientifically based prevention of microelementoses in the regions of Russia and Mongolia]. *Izdatel'skiy tsentr Kan*.
21. Sindireva, A.V., Zayko, O.A., Mangutova, A.K. (2025). Ekologo-toksikologicheskaya otsenka vozmozhnosti primeneniya selena dlya korrektsii svintsovoy intoksikatsii u kryss [Ecological-toxicological assessment of the possibility of using selenium for correction of lead intoxication in rats]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 1, 168–176.
22. Skrypnik, L., Feduraev, P., Golubkina, N., Maslennikov, P., Antipina, M., Katserov, D., Murariu, O.C., Tallarita, A.V., Caruso, G. (2024). Foliar spraying of selenium in inorganic and organic forms stimulates plant growth and secondary metabolism of sage (*Salvia officinalis* L.) through alterations in photosynthesis and primary metabolism. *Scientia Horticulturae*, 338, 113633. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.113633>
23. Tallarita, A.V., Golubkina, N., De Pascale, S., Şekara, A., Pokluda, R., Murariu, O.C., Cozzolino, E., Cenvinzo, V., Caruso, G. (2025). Effects of selenium/iodine foliar application and seasonal conditions on yield and quality of perennial wall rocket. *Horticulturae*, 11(2), 211. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11020211>
24. Wang, M., Zhou, F., Cheng, N., Chen, P., Ma, Y., Zhai, H., Qi, M., Liu, N., Liu, Y., Meng, L., Bañuelos, G.S., Liang, D. (2022). Soil and foliar selenium application: Impact on accumulation, speciation, and bioaccessibility of selenium in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Frontiers in Plant Science*, 13, 988627. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.988627>
25. Yerzhanova, A., Baranovskaya, N., Khussainov, A., Zhumay, Y., Niyazova, A., Akhmetzhan, A., Sarsembin, U. (2025). Influence of the environment on the chemical element content in women's blood. *International Journal of Environmental Impacts*, 8(3), 203–209.
26. Zharkova, N.N., Sukhotskaya, V.V., Ermokhin, Yu.I. (2020). Soderzhanie nekotorykh biologicheskii aktivnykh veshchestv i khimicheskikh elementov v lekarstvennom syr'e *Echinacea purpurea* (L.) Moench pod vliyaniem essentsial'nogo mikroelementa Cu [Content of some biologically active substances and chemical elements in medicinal raw materials of *Echinacea purpurea* (L.) Moench under the influence of essential trace element Cu]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 55(3), 588–596. <https://doi.org/10.15389/agrobiolgy.2020.3.588rus>

Агроэкожүйелердегі экологиялық инжиниринг: Солтүстік Моңғолия жағдайында жаздық жұмсақ бидайды селенмен байыту

Анна Синдирева, Эрдэнээ Эрдэнэцогт, Анна Мангутова, Виктория Иеронова, Радмир Косолапов

Аннотация. Мақалада селен мен йод микроэлементтерінің жаздық жұмсақ бидайдың (*Triticum aestivum* L.) өсуі мен даму көрсеткіштеріне әсерін кешенді талдау ұсынылған. Далалық тәжірибелер натрий селенитінің, натрий селенатының және калий йодидінің

биометриялық параметрлер мен дақыл өнімділігіне әсерін зерттеді. Нәтижелер тыңайтқыш ретінде микроэлементтердің әртүрлі формалары мен дозаларын қолдануға өсімдіктердің сараланған реакциясын көрсетеді. Натрий селениті масақтың жеке өнімділігінің төмендеуіне қарамастан, өсімдіктердің тығыздығын арттыру арқылы тұрақты өнімділікті қамтамасыз ететін ең айқын оң әсерді көрсетті. Тамырсыз өңдеу үшін қолданылатын селенит пен натрий селенатының ерітінділеріндегі селен концентрациясы мен оның дәндегі құрамы арасында тікелей байланыс орнатылған ($r = 0,99$). Натрий селенатын қолданған кезде селенитпен ($b = 44,94$) салыстырғанда селеннің неғұрлым қарқынды жинақталуы ($b = 80,23$ коэффициенті) байқалады. Натрий селенатының ерітіндісіндегі селеннің максималды концентрациясында (0,01%) бидай дәніндегі микроэлементтердің мөлшері бақылаумен салыстырғанда 6,4 есе өсті.

Түйін сөздер: биофортификация, жаздық бидай, селен (Se), йод (I), тамырдан тыс азықтандыру

Ecological engineering in agroecosystems: selenium enrichment of spring soft wheat under the conditions of Northern Mongolia

Anna Sindireva, Erdenee Erdenetsogt, Anna Mangutova, Victoria Ieronova, Radmir Kosolapov

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the influence of selenium and iodine micronutrients on the growth and development indicators of spring soft wheat (*Triticum aestivum* L.). Field experiments were conducted to study the effect of sodium selenite, sodium selenate and potassium iodide on the biometric parameters and yield of the crop. The results demonstrate a differentiated response of plants to the application of various forms and doses of trace elements as fertilisers. Sodium selenite showed the most pronounced positive effect, ensuring stable yield by increasing plant density, despite a decrease in individual ear productivity. A direct correlation has been established between the concentration of selenium in selenite and sodium selenate solutions used for foliar application and its content in grain ($r = 0.99$). When sodium selenate was used, a more intense accumulation of selenium was observed (coefficient $b = 80.23$) compared to selenite ($b = 44.94$). At the maximum concentration of selenium in the sodium selenite solution (0.01%), the content of the microelement in wheat grain increased 6.4 times compared to the control.

Keywords: biofortification, spring wheat, selenium (Se), iodine (I), foliar feeding