

DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-4-439-458

**А.В. Синдирева, Н.Е. Гурьев**

Тюменский государственный университет,  
625003 г. Тюмень, Российская Федерация

## Факторы, влияющие на содержание селена в серых лесных почвах и сельскохозяйственных культурах юга Тюменской области

В статье проведен анализ особенностей содержания селена в серых лесных почвах, а также произрастающих на них растениях на примере территории юга Тюменской области. Диапазон валового содержания селена в пахотном горизонте серых лесных почв пяти административных районов юга Тюменской области варьирует от 0,04 до 0,08 мг/кг и достоверно не отличается. Определены взаимосвязи содержания селена с макро- и микроэлементами (валовое содержание, подвижные формы) и основными агрохимическими показателями, такими, как гумус, водородный показатель. Наибольшее влияние на аккумуляцию селена в верхнем пахотном горизонте серых лесных типов почв оказывает медь, цинк, калий, фосфор, гумус, рНКСl. Менее выражена зависимость с кобальтом, железом, серой, азотом нитратным и аммиачным, кальцием, магнием. Содержание селена в зерне *Triticum aestivum* сорта Тобольская степная находится в интервале от 0,003 до 0,092 мг/кг и характеризуется как недостаточное. Изучены взаимосвязи в питании растений между селеном и другими химическими элементами на примере *Triticum aestivum* сорта Тобольская степная. Согласно результатам регрессионного анализа, взаимосвязь селена

с марганцем, цинком, медью в зерне яровой мягкой пшеницы характеризуется синергизмом, а в парах Se–Hg, Se–Cd, Se–As отмечены явления антагонизма. Полученные данные можно использовать для прогноза накопления селена в системе почва–растение для конкретных агроэкологических условий.

**Ключевые слова:** селен, серые лесные почвы, накопление селена в растениях, макроэлементы в почве, микроэлементы в почве, Тюменская область, *Triticum aestivum*

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Министерства образования, культуры, науки и спорта Монголии в рамках научного проекта № 20-55-44028.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Синдирева А.В., Гурьев Н.Е. Факторы, влияющие на содержание селена в серых лесных почвах и сельскохозяйственных культурах юга Тюменской области // Социально-экологические технологии. 2022. Т. 12. № 4. С. 439–458. DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-4-439-458

Original research

DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-4-439-458

**A.V. Sindireva, N.E. Guryev**

Tyumen State University,  
Tyumen, 625003, Russian Federation

## Factors influencing selenium content in gray forest soils and agricultural crops in the South of Tyumen region

The article analyzes the content of selenium in gray forest soils and plants growing on them on the example of the south of Tyumen region. The range of gross selenium content in the arable horizon of gray forest soils of five administrative districts in the south of Tyumen region varies from 0.04 to 0.08 mg/kg and does not differ significantly. Correlations of selenium content with macro- and microelements (gross content, mobile forms) and

basic agrochemical indices such as humus, hydrogen index were determined. The greatest influence on the accumulation of selenium in the upper arable horizon of gray forest soil types has copper, zinc, potassium, phosphorus, humus, and pHKCl. The dependence with cobalt, iron, sulfur, nitrate and ammonia nitrogen, calcium, and magnesium is less pronounced. The content of selenium in grain of *Triticum aestivum* variety Tobolskaya steppe is in the range from 0,003 to 0,092 mg/kg and is characterized as insufficient. The relationships in plant nutrition between selenium and other chemical elements were studied on the example of *Triticum aestivum* variety Tobolskaya steppe. According to the results of regression analysis, the relationship between selenium and manganese, zinc, copper in grain of spring wheat is characterized by synergism, and in pairs Se–Hg, Se–Cd, Se–As the phenomenon of antagonism is noted. The obtained data can be used to predict the accumulation of selenium in the soil-plant system for specific agro-ecological conditions.

**Key words:** Selenium, gray forest soils, plants, macroelements in the soil and microelements in the soil, Tyumen region, *Triticum aestivum*

**Acknowledgments.** The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, and the Ministry of Education, Culture, Science and Sports of Mongolia within the framework of scientific project number 20-55-44028.

FOR CITATION: Sindireva A.V., Guryev N.E. Factors influencing selenium content in gray forest soils and agricultural crops in the South of Tyumen region. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2022. Vol. 12. No. 4. Pp. 439–458. (In Rus.) DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-4-439-458

## Введение

Селен является одним из важных микроэлементов, оказывающих биологическое действие на живые организмы. Как при его избытке, так и недостатке отмечается ряд эндемичных заболеваний. Содержание данного элемента и его распространение в объектах окружающей среды крайне низкое. Селен является рассеянным микроэлементом, который входит в состав порядка 40 минералов. Основным источником поступления селена в растения, следовательно, в организм животных и человека являются почвы и подстилающие их горные породы.

Содержание селена в почвах разного генезиса может находиться в диапазонах от 0,01 до 1,2 мг/кг, однако его количество в отдельных регионах может достигать и 10 мг/кг [Ильин, 1991; Микроэлементозы..., 1991; Иванов, 1996, с. 240–274; Вощенко, 1998; Волкотруб, Андропова,

2001; Майманова, 2003; Ермаков, 2004; Сысо, 2007; Полосина, 2009; Синдирева, Голубкина, 2011; Синдирева, Котченко, Гурьев, 2021].

Проведенные полевые и лабораторные исследования 2020–2021 гг. свидетельствуют о крайне низком количестве селена в основных типах почв территории Тюменской области: содержание микроэлемента в исследуемых почвах изменяется в интервале от 0,006 до 0,09 мг/кг. Поэтому можно прогнозировать его недостаточное содержание в системе почва–растение–животное и, как следствие, низкий селеновый статус населения региона [Синдирева, Котченко, Гурьев, 2021].

Распределение почв юга Тюменской области по содержанию селена от наиболее низкой концентрации к высокой выглядит следующим образом: аллювиально-луговая > серая лесная (светло-серая) > чернозем выщелоченный > лугово-глеватая > серая лесная (серая лесная > серая лесная (темно-серая)) > пойменная дерновая > пойменно аллювиальная – типичная [Там же]. Однако представляет особый интерес изучение распределение селена в пределах одного типа почв и определение эдафических факторов, влияющих на его аккумуляцию, а также его миграции в системе почва–растение.

*Цель исследования:* геохимическая оценка аккумуляции селена в пахотном горизонте серых лесных типах почв и растениях юга Тюменской области.

*Задачи исследования:*

- проанализировать содержание селена в пахотном горизонте серых лесных типах почв юга Тюменской области;
- установить корреляцию между содержанием селена и агрохимическими показателями серых лесных почв;
- изучить содержание селена в растениях, выращенных на серых лесных почвах реперных участков юга Тюменской области;
- выявить взаимосвязи при поступлении между макро- и микроэлементами и селеном в растения яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Тобольская степная, произрастающей на изученных участках юга Тюменской области;
- установить факторы, влияющие на аккумуляцию селена в системе почва–растение на серых лесных почвах юга Тюменской области.

## Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись серые лесные почвы как одни из распространенных зональных типов почв юга Тюменской области, а также растения яровой мягкой пшеницы сорта Тобольская степная, выращиваемой на территории исследования.

Образцы почвы и произрастающих на них растений отобраны в пяти административных районах юга Тюменской области: Омутинском (в районе населенного пункта Новодеревенская), Нижнетавдинском (в районе населенного пункта Малые Велижаны), Упоровском (в районе населенного пункта Упорово), Ярковском (в районе населенного пункта Усалка) и Тюменском (в районе населенного пункта Успенка).

В качестве исследуемых образцов почв в данной работе были серые лесные, подтип темно-серые лесные почвы реперных участков Федерального государственного бюджетного учреждения Государственный центр агрохимической службы «Тюменский» (ФГБУ ГЦАС «Тюменский») юга Тюменской области. Рассматриваемый тип почвы занимает 6,3% территории юга Тюменской области. Общая площадь серых лесных типов почв составляет 370 тыс. га, темно-серых лесных – 360 тыс. га, светло-серых лесных – 161,2 тыс. га. Данный тип почв формируется на территориях лесостепной зоны в условиях водного режима преимущественно широколиственных, смешанных или мелколиственных типов лесов с разнообразным и обильным травяным покровом. Типичная морфология изучаемых почв выглядит следующим образом:  $A_{\text{пах}} + A_2 + BA_2 + B + BC_{(к)} + C_{к}$ .

Стоит отметить, что темно-серые подтипы почв характеризуются интенсивными дерновыми и наименее интенсивными подзолистыми процессами. Мощность гумусового горизонта в данном подтипе серых лесных почв может достигать до 40 см. Как правило, это слабокислые почвы с наличием характерных новообразований кальция на глубинах 120–150 см [Каретин, 1990].

Исследования проведены в 2020–2022 гг. При обобщении и анализе материала использовались собственные исследования и материалы отчетов ФГБУ ГЦАС «Тюменский» по обследованию пахотных почв Тюменской области.

Почвенные образцы отбирались методом конверта на пахотных почвах. Всего отобрано 20 проб почв. Отбор проб проводился с глубины 0–20 см в связи с аккумулярующими свойствами верхних почвенных горизонтов, в которых происходит накопление различных загрязнителей (тяжелые металлы, пестициды, радионуклиды и т.д.), а также по причине концентрации микроэлементов (в том числе селена), которые активно включаются в трофическую цепь<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> ГОСТ 17.4.4.02–2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.

Растения отбирались на тех же участках, где образцы почвы, методом конверта. Объектом исследования являлась яровая мягка пшеница сорта Тобольская степная, всего отобрано 20 проб<sup>2</sup>.

Определение селена в почвенных и растительных образцах проводилось в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Уральскому федеральному округу» по Тюменской области методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой<sup>3</sup>, предназначенный для определения массовой доли селена в почвенных и растительных образцах.

Определение в почве агрохимических показателей, в растениях макро- и микроэлементов проводилось в аккредитованной лаборатории ФГБУ ГЦАС «Тюменский» с применением стандартных методик. Математическая обработка результатов осуществлялась стандартными статистическими методами с использованием компьютерного пакета программ Statistika, MS Excel.

### Результаты и обсуждение

Агрохимическая характеристика серых лесных почв юга Тюменской области и результаты оценки валового содержания селена, полученные при проведении анализа проб, отобранных на реперных участках Омутинского, Нижнетавдинского, Упоровского, Яркового, Тюменского районов юга Тюменской области, представлены в табл. 1–3.

Установлено, что содержание селена в образцах серых лесных почв, отобранных в разных административных районах, достоверно не отличается. Все представленные административные районы, за исключением Нижнетавдинского (подтаежная), территориально располагаются в одной природной зоне (лесостепь).

Диапазон содержания селена в серых лесных почвах пяти административных районах юга Тюменской области варьирует от 0,04 до 0,08 мг/кг, средняя концентрация селена в почвах составляет 0,06 мг/кг при максимальном содержании 0,08 мг/кг в Янковском административном районе и минимальном 0,04 мг/кг в Тюменском. Оценка уровня содержания селена в почве принималась по следующим пороговым значениям концентрации изучаемого микроэлемента: менее 125 мкг/кг – область селенодефицита; 125–175 мкг/кг – маргинальная недостаточность; 175–3000 мкг/кг – область оптимума; более 3000 мкг/кг – область избытка.

<sup>2</sup> ГОСТ 13586.3–2015. Зерно. Правила приемки и метод отбора проб.

<sup>3</sup> ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

**Валовое содержание селена в верхнем пахотном горизонте серых лесных почв  
административных районов юга Тюменской области**  
**[Gross selenium content in the upper arable horizon of gray forest soils in the administrative districts  
of the south of Tyumen region]**

Административный район реперного участка [Administrative district of the reference area]	Тип почвы [Soil type]	Подтип почвы [Soil subtype]	Гранулометрический состав [Granulometric composition]	Содержание селена, мг/кг [Selenium content, mg/kg]	
Ярковский [Yarkovsky]	Серые лесные [Gray forest]	Светло-серые [Light gray]	Средний суглинок [Medium loam]	0,08 ± 0,03	
Омутинский [Omutinsky]		Темно-серая [Dark gray]		0,07 ± 0,02	
Нижнетавдинский [Nizhnetavdinsky]		Серые лесные [Gray forest]			0,06 ± 0,01
Упоровский [Urovovsky]					0,05 ± 0,02
Тюменский [Tyumensky]					0,04 ± 0,02
<i>Сводные данные [Summary data]</i>					
Максимальное содержание, мг/кг [Max content, mg/kg]				0,08	
Минимальное содержание, мг/кг [Min content, mg/kg]				0,04	
Среднее содержание, мг/кг [Average content, mg/kg]				0,06	

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что территория юга Тюменской области относится к категории селенодефицитной [Tan et al., 2002].

Низкое содержание селена в серых лесных почвах можно предположительно обосновать тем, что основная часть селена не аккумулируется в гумусовом горизонте в связи с его гранулометрическим составом и малой мощностью, а мигрирует под действием естественных процессов сначала в горизонт  $A_1A_2$  и концентрируется в горизонте В.

Помимо физических факторов, оказывающих влияние на миграцию селена в почвах, существенную роль в его распределении в верхних почвенных горизонтах оказывают и химические факторы, а именно содержание макро- и микроэлементов и другие агрохимические показатели. В данном исследовании для определения взаимосвязей между селеном и химическими элементами были использованы предоставленные ФГБУ ГЦАС «Тюменский» данные агрохимических обследований (табл. 2–3) почв изучаемой территории.

Содержание химических элементов в исследуемых образцах реперных участков не превышает действующих предельно допустимых концентраций и ориентировочно допустимых концентраций и соответствует нормативной документации, что говорит об относительной стабильной экологической ситуации изучаемой территории. Однако тревогу может вызывать не только повышенное содержание химических элементов в почве, но и их недостаток, что тоже может сказываться на качестве растениеводческой продукции. Таким элементом является селен. Его недостаток обусловлен не только составом материнских пород, но и взаимодействием с другими физико-химическими параметрами почвы.

Для определения геохимических факторов, влияющих на аккумуляцию селена в серых лесных почвах юга Тюменской области, установлены взаимосвязи его содержания с рядом агрохимических параметров. Уравнения зависимости представлены в табл. 4 и 5.

Наибольшее влияние на аккумуляцию селена в верхнем пахотном горизонте серых лесных типов почв оказывает медь, цинк, калий, фосфор, гумус, рНКСl.

Менее выраженная или отсутствует зависимость с кобальтом, железом, серой, азотом как нитратным, так и аммиачным, кальцием, магнием.

В ряде работ отечественных и зарубежных ученых установлена геохимическая связь селена с медью, алюминием, гумусом, водородным показателем рН и другими макро- и микроэлементами. В окислительных и восстановительных условиях селен в связи с его химическими особенностями является аналогом серы, замещая ее [Tan et al., 2002; Барabanщикова, 2013; Голубкина, Полубояринов, Синдирева, 2017].



Агрохимическая характеристика серых лесных почв юга Тюменской области  
(по данным Государственного центра агрохимической службы «Тюменский»)  
[Agrochemical characteristics of gray forest soils in the south of Tyumen region  
(according to “Tyumensky” State Center for Agrochemical Service)]

Административный район реперного участка [Administrative district of the reference area]	Агрохимические показатели [Agrochemical indicators]											
	Гумус, % [Humus, %]	P*, мг/кг [P*, mg/kg]	K*, мг/кг [K*, mg/kg]	Al*, мг/кг [Al*, mg/kg]	pHКCl, мг/кг [pHКCl, mg/kg]	Нг, мг/кг [Нг, mg/kg]	Ca <sup>2+**</sup> , мг экв. / 100 г почвы [Ca <sup>2+**</sup> , мг экв. / 100 г почвы]	Mg <sup>2+**</sup> , мг экв. / 100 г почвы [Mg <sup>2+**</sup> , мг экв. / 100 г почвы]	Сумма поглощенных оснований, мг/кг [The amount of absorbed bases, mg/kg]	Азот нитратный, мг/кг [Nitrate nitrogen, mg/kg]	Азот аммиачный, мг/кг [Ammonia nitrogen, mg/kg]	S, мг/кг [S, mg/kg]
Ярковский [Yarkovsky]	3,6	21,1	91,5	0,05	5,1	2,74	12,5	2,50	16,8	4,70	6,1	6,3
Омутинский [Omutinsky]	4,4	65,6	152,0	0,05	5,2	3,13	19,5	3,50	24,4	1,82	5,6	5,0
Нижнетавдинский [Nizhnetavdinsky]	3,7	63,1	125,0	0,05	4,8	3,26	12,3	2,25	15,6	1,45	4,8	7,3
Упоровский [Uporovsky]	6,1	284,4	130,0	0,05	5,6	2,41	14,3	1,50	21,8	4,80	6,3	6,2
Тюменский [Tyumensky]	4,5	117,1	368,0	0,05	6,0	1,63	15,0	3,25	25,6	1,48	4,9	5,3

Окончание табл. 2

Административный район реперного участка [Administrative district of the reference area]	Агрохимические показатели [Agrochemical indicators]											
	Гумус, % [Humus, %]	P*, мг/кг [P*, mg/kg]	K*, мг/кг [K*, mg/kg]	Al*, мг/кг [Al*, mg/kg]	pHКСl, мг/кг [pHКСl, mg/kg]	Нг, мг/кг [Нг, mg/kg]	Ca <sup>2+*</sup> , мг экв. / 100 г почвы [Ca <sup>2+*</sup> , mg экв. / 100 г почвы]	Mg <sup>2+*</sup> , мг экв. / 100 г почвы [Mg <sup>2+*</sup> , mg экв. / 100 г почвы]	Сумма поглощенных оснований, мг/кг [The amount of absorbed bases, mg/kg]	Азот нитратный, мг/кг [Nitrate nitrogen, mg/kg]	Азот аммиачный, мг/кг [Ammonia nitrogen, mg/kg]	S, мг/кг [S, mg/kg]
Сводные данные [Summary data]												
Максимальное содержание [Maximum content]	6,1	284,4	368,0	0,05	6,00	3,26	19,50	3,5	25,60	4,80	6,30	7,3
Минимальное содержание [Minimum content]	3,6	21,1	91,5	0,05	4,80	1,63	12,30	1,5	15,60	1,45	4,80	5,0
Среднее содержание [Average content]	4,5	110,2	173,3	0,05	5,34	2,63	14,72	2,6	20,84	2,85	5,54	6,0

Примечание. \* – подвижная форма элемента; \*\* – обменная форма элемента.

[Note. \* – mobile form; \*\* – exchange form of the element]

Таблица 3

**Содержание микроэлементов в серых лесных почвах реперных участков юга Тюменской области  
(по данным Государственного центра агрохимической службы «Тюменский»)  
[The content of trace elements in gray forest soils of the reference areas in the south of Tyumen region  
(according to “Tyumensky” State Center for Agrochemical Service)]**

Административный район реперного участка [Administrative district of the reference area]	Содержание подвижных форм микроэлементов, мг/кг [Content of mobile forms of microelements, mg/kg]					
	B	Cu	Zn	Co	Mn	Fe
Ярковский [Yarkovsky]	0,5	0,21	1,21	0,13	19,34	28,70
Омутинский [Omutinsky]	0,5	0,21	0,61	0,14	13,10	12,90
Нижнетавдинский [Nizhnetavdinsky]	0,5	0,20	0,61	0,13	9,52	64,50
Упоровский [Uporovsky]	0,5	0,22	0,61	0,12	18,57	16,10
Тюменский [Tyumensky]	0,5	0,23	0,85	0,13	25,29	11,30
<i>Сводные данные [Summary data]</i>						
Максимальное содержание [Maximum content]	0,5	0,23	1,21	0,14	25,29	28,70
Минимальное содержание [Minimum content]	0,5	0,20	0,61	0,12	9,52	11,30
Среднее содержание [Average content]	0,5	0,21	0,13	0,44	17,16	28,70

Таблица 4

**Характер взаимодействия между содержанием селена  
и микроэлементами в серых лесных почвах юга Тюменской области**  
[**Nature of interaction between the content of selenium  
and trace elements in gray forest soils in the south of Tyumen region**]

Микроэлемент [Trace element]	Уравнение регрессии [Regression Equation]	Характер взаимодействия [The nature of the interaction]
Cu	$-0,44x + 0,24, r = 0,74$	Антагонизм [Antagonism]
Zn	$109,87x + 29,24, r = 0,70$	Синергизм [Synergism]
Co	$0,166x + 0,119, r = 0,40$	Синергизм [Synergism]
Mn	$159,88x + 27,49, r = 0,50$	Синергизм [Synergism]
Fe	$502,07x - 3,73, r = 0,41$	Синергизм [Synergism]
K	$-4503,1x + 64,2, r = 0,76$	Антагонизм [Antagonism]
S	$9,20x + 5,4201, r = 0,20$	Синергизм [Synergism]
P	$-3504,1x + 336,62, r = 0,64$	Антагонизм [Antagonism]
Азот нитратный [Nitrate nitrogen]	$25,79x + 1,18, r = 0,28$	Синергизм [Synergism]
Азот аммиачный [Ammonia nitrogen]	$12,56x + 4,73, r = 0,34$	Синергизм [Synergism]
Гумус [Humus]	$-30,0x + 6,42, r = 0,56$	Антагонизм [Antagonism]
pHКCl	$-19,36x + 6,59, r = 0,78$	Антагонизм [Antagonism]
Ca <sup>2+</sup>	$-3,36x + 14,94, r = 0,02$	Антагонизм [Antagonism]
Mg <sup>2+</sup>	$-3,42x + 2,38, r = 0,07$	Синергизм [Synergism]

Примечание.  $x$  – содержание селена, мг/кг.

[Note.  $x$  – selenium content, mg/kg.]

В статье установлена корреляция между содержанием селена и гумуса, селена и pHКCl. Согласно представленным результатам уравнения регрессионного анализа (см. табл. 4) выявлена отрицательная корреляционная связь ( $r = 0,56$ ) с гумусом и pHКCl ( $r = 0,78$ ), что говорит о том, что содержание гумуса и кислотность оказывают влияние на содержание селена в изучаемом типе почв. В кислых почвах с большим преобладанием органического вещества присутствуют селениды и сульфиды селена, которые плохо усваиваются растениями.

В нейтральной среде преобладают селениты, а в щелочных условиях преобладают селенаты, которые в связи с их легкой растворимостью хорошо усваиваются растениями.

Проведенный анализ показал обратную зависимость между содержанием селеном и калием. При увеличении содержания калия в почвах наблюдается уменьшение содержания валового селена в почвах.

Для меди, как и для калия, характерна обратная зависимость, где при увлечении содержания одного элемента снижается содержание другого. Так, при увеличении содержания меди наблюдается уменьшение содержания селена в верхнем пахотном горизонте почвы.

Увеличение содержания цинка в почве способствует накоплению селена. В Тюменском районе содержание селена составляет 0,04 мг/кг при содержании цинка в 0,85 мг/кг, а в Ярковском районе при более высоком среднем содержании цинка наблюдается увеличение содержания селена до 0,08 мг/кг.

Подводя итоги, стоит отметить и тот факт, что на содержание селена помимо макро- и микроэлементов, а также агрохимических показателей влияние оказывают такие факторы, как климатические особенности, гранулометрический состав горных пород и минералов, слагающих почвы и их водно-промывной режим, а также наличие антропогенного воздействия на территорию.

Большое значение для сельского хозяйства и санитарно-эпидемиологических условий территории проживания населения служит содержание селена в сельскохозяйственных культурах, накопление которого напрямую зависит от исходного количества этого микроэлемента в почвах.

Диапазон содержания селена в растительных сообществах достаточно разнообразен и имеет широкий интервал, который зависит от химического состава почв и вида растения. Поступление селена в растение осуществляется с помощью поглощения данного элемента корневой системой из почв, при этом одними из основных форм микроэлемента являются селениты, селенаты, которые связаны с оксидами железа, алюминия, марганца, карбонатами, водородным показателем pH и органическим веществом почвы. Наиболее благоприятными условиями для поглощения селена растениями служит аридный климат, хорошая аэрация почвы, а также низкое содержание pH и большое содержание органического вещества [Капитальчук и др., 2011].

В табл. 5 и 6 представлены результаты исследования проб зерна яровой мягкой пшеницы сорта Тобольская степная, отобранной на реперных участках ФГБУ ГЦАС «Тюменский».

**Содержание селена в зерне *Triticum aestivum*  
[Selenium content in *Triticum aestivum* grain]**

Административный район реперного участка [Administrative district of the reference area]	Содержание селена, мг/кг [Se content, mg/kg]
Омутинский [Omutinsky]	0,046
Нижнетавдинский [Nizhnetavdinsky]	0,018
Упоровский [Uporovsky]	0,092
Тюменский [Tyumensky]	0,003
<i>Сводные данные [Summary data]</i>	
Максимальное содержание [Maximum content]	0,092
Минимальное содержание [Minimum content]	0,003
Среднее содержание [Average content]	0,039

Средний интервал концентрации селена в зерне яровой мягкой пшеницы сорта Тобольская степная юга Тюменской области варьирует от 0,003 до 0,092 мг/кг. Согласно проведенным исследованиям отечественных и зарубежных ученых, содержание селена в зерновых культурах варьируется в интервале от 0,004–0,005 мг/кг (США, Канада) и до 0,6 мг/кг (Читинская область, Монголия). Для большей части сельскохозяйственных культур, используемых в пищу на территории Российской Федерации, характерно недостаточное количество данного микроэлемента. К такой территории относится и юг Тюменской области [Синдирева, 2012; Синдирева, Котченко, Гурьев, 2021].

Для определения факторов, оказывающих влияние на содержание селена в растениях яровой мягкой пшеницы юга Тюменской области, были установлены его взаимосвязи с макро- и микроэлементами. Результаты регрессионного анализа представлены в табл. 7.

Согласно представленным результатам уравнения регрессионного анализа (см. табл. 7) установлено, что влияние на аккумуляцию селена в зерне *Triticum aestivum* оказывает мель, марганец, кобальт, цинк, свинец, ртуть, кадмий, мышьяк. Менее выраженная зависимость с содержанием нитратов.

При увеличении содержания ряда элементов отмечается прямо пропорциональное повышение уровня селена. Такими элементами являются цинк (24,66–38,19 мг/кг) и свинец (0,32–0,42 мг/кг), где при увлечении содержания этих элементов наблюдалось накопление селена в растениях.

Таблица 6

**Содержание химических элементов в зерне *Triticum aestivum***  
**(по данным Государственного центра агрохимической службы «Тюменский»)**  
**[Chemical element content in *Triticum aestivum* grain**  
**(according to “Tyumensky” State Center for Agrochemical Service)]**

Административный район реперного участка [Administrative district of the reference area]	Содержание химических элементов, мг/кг [Content of chemical elements, mg/kg]								
	Mn	Co	Cu	Zn	Pb	Hg	Cd	As	Нитраты [Nitrates]
Омутинский [Omutinsky]	19,67	0,06	4,10	34,71	0,35	0,0025	0,04	0,03	282
Нижнетавдинский [Nizhnetavdinsky]	28,91	0,05	4,66	36,85	0,40	0,0025	0,05	0,03	31
Упоровский [Uporovsky]	26,14	0,05	4,40	38,19	0,42	0,0025	0,04	0,03	31
Тюменский [Tyumensky]	48,84	0,09	4,66	24,66	0,32	0,0098	0,26	0,09	166
<i>Сводные данные [Summary data]</i>									
Максимальное содержание [Maximum content]	48,84	0,09	4,66	38,19	0,422	0,0098	0,26	0,089	282
Минимальное содержание [Minimum content]	19,67	0,05	4,1	24,66	0,322	0,0025	0,049	0,029	31
Среднее содержание [Average content]	30,89	0,06	4,5	33,6	0,37	0,004	0,09	0,04	127,5

**Характер взаимодействия между содержанием селена  
и химическими элементами в зерне *Triticum aestivum*  
[Nature of interaction between selenium content  
and chemical elements in *Triticum aestivum* grain]**

Микроэлемент [Trace element]	Уравнение регрессии [Regression Equation]	Характер взаимодействия [The nature of the interaction]
Mn	$8,47x + 9,71, r = 0,87$	Синергизм [Synergism]
Co	$-0,31x + 0,075, r = 0,63$	Антагонизм [Antagonism]
Zn	$109,87x + 29,235, r = 0,70$	Синергизм [Synergism]
Cu	$3,72x + 4,6029, r = 0,54$	Синергизм [Antagonism]
Pb	$0,8x + 0,34, r = 0,69$	Синергизм [Synergism]
Hg	$-0,06x + 0,007, r = 0,62$	Антагонизм [Antagonism]
Cd	$-1,75x + 0,17, r = 0,64$	Антагонизм [Antagonism]
As	$-0,51x + 0,065, r = 0,66$	Антагонизм [Antagonism]
Нитраты [Nitrate]	$-738,66x + 156,86, r = 0,24$	Антагонизм [Antagonism]

Примечание.  $x$  – содержание селена, мг/кг.

[Note.  $x$  – selenium content, mg/kg.]

Таким образом, можно сделать вывод о том, что на аккумулятивную способность селена в зерне яровой мягкой пшеницы могут оказывать влияние такие металлы, как свинец, цинк, марганец, медь, т.к. при увлечении их содержания в растении происходит прямо пропорциональное увеличение уровня селена.

Можно сделать вывод о том, что на накопление селена в продуктах растительного происхождения влияет не только его содержание в почвенном покрове, но и химическая конкуренция в самом растении, которая зависит от вида растения, физиологических свойств химических элементов, фазы развития растительного организма.

От миграции селена в системе почва–растение зависит содержание данного микроэлемента в продуктах растительного и животного происхождения и в конечном звене пищевой цепи – человеке [Микроэлемент селен..., 2000; Ермаков, 2004; Капитальчук и др., 2011]. Из перечисленных выше факторов и будет складываться общий «селеновый статус»



территории, который говорит о переизбытке или недостатке микроэлементов в компонентах окружающей среды.

На миграционную способность селена и его участие в трофических цепях большое значение оказывают зональные особенности ландшафта, которые складываются из климатических, геолого-геоморфологических, гидрологических, почвенных и геохимических особенностей, а также биологические особенности растений.

В целом можно отметить, что содержание селена в исследуемых образцах серой лесной почвы и произрастающих на ней растениях яровой мягкой пшеницы находится в недостатке, поэтому можно предположить, что проживаемое на данной территории население имеет риски появления различных болезней, ассоциированных с селенодефицитом.

## Выводы

1. Содержание селена в пахотном горизонте серых лесных почв пяти административных районов юга Тюменской области варьирует от 0,04 до 0,08 мг/кг и достоверно не отличается.

2. Наибольшее влияние на аккумуляцию селена в верхнем пахотном горизонте серых лесных типов почв оказывает медь, цинк, марганец, калий, фосфор, гумус, рНКСl; менее выражена зависимость с кобальтом, железом, серой, азотом нитратным и аммиачным, кальцием, магнием.

3. Содержание селена в зерне яровой мягкой пшеницы сорта Тобольская степная юга Тюменской области варьирует от 0,003 до 0,092 мг/кг и характеризуется как недостаточное.

4. Взаимосвязь селена с марганцем, цинком, медью в зерне яровой мягкой пшеницы характеризуется синергизмом, а в парах Se–Hg, Se–Cd, Se–As отмечены явления антагонизма.

Полученные данные можно использовать для прогноза накопления селена в системе почва–растение для конкретных агроэкологических условий.

## Библиографический список / References

Барабанщикова Л.Н. Содержание и распределение селена в агроландшафтах Северного Зауралья: Дис. ... канд. биол. наук. Тюмень, 2013. [Barabanshchikova L.N. Soderzhanie i raspredelenie selena v agrolandshaftakh Severnogo Zauralya [The content and distribution of selenium in the agricultural landscapes of the Northern Trans-Urals]. PhD dis. Tyumen, 2013.]

Волкотруб Л.П., Андропова Л.П. Роль селена в развитии и предупреждении заболеваний (обзор) // Санитарная гигиена. 2001. № 2. С. 57–61. [Volkotrub L.P.,

Andropova T.V. The role of selenium in the development and prevention of diseases (review). *Sanitarnaya gigiena*. 2001. No. 2. Pp. 57–61. (In Rus.)]

Вощенко А.В. Алиментарная селенодефицитная эндемическая дисталационная кардиомиопатия (кешанская болезнь). Чита, 1998. [Voshchenko A.V. Alimentarnaya selenodefitsitnaya endemicheskaya distalatsionnaya kardiomiopatiya (keshanskaya bolezn') [Alimentary selenium deficiency endemic distal cardiomyopathy (Keshan disease)]. Chita, 1998.]

Голубкина Н.А., Полубояринов П.А., Синдирева А.В. Селен в продуктах растительного происхождения // Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 2. С. 63–69. [Golubkina N.A., Poluboyarinov P.A., Sindireva A.V. Selenium in plant foods. *Voprosy pitaniya*. 2017. Vol. 86. No. 2. Pp. 63–69. (In Rus.)]

Ермаков В.В. Биогеохимия селена и его значение в профилактике эндемических заболеваний человека // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2004. № 1 (22). [Ermakov V.V. Biogeochemistry of selenium and its importance in the prevention of endemic human diseases. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN*. 2004. No. 1 (22). (In Rus.)]

Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. М., 1996. [Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov* [Ecological geochemistry of elements]. Moscow, 1996.]

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

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. [Kapitalchuk M.V., Kapitalchuk I.P., Golubkina N.A. Accumulation and migration of selenium in the components of the biogeochemical chain “soil – plants – human” in the conditions of Moldova. *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*. 2011. No. 3. Pp. 323–335. (In Rus.)]

Каретин Л.Н. Почвы Тюменской области. Новосибирск, 1990. [Karetin L.N. *Pochvy Tyumenskoï oblasti* [Soils of the Tyumen region]. Novosibirsk, 1990.]

Майманова Т.М. Селен в основных компонентах ландшафтов Горного Алтая: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2003. [Maimanova T.M. *Selen v osnovnykh komponentakh landshaftov Gornogo Altaya* [Selenium in the main components of the landscapes of the Altai Mountains]. PhD theses. Novosibirsk, 2003.]

Микроэлемент селен: роль в процессах жизнедеятельности / Гмошинский И.В., Мазо В.К., Тутельян В.А., Хотимченко С.А. // Экология моря. 2000. № 54. С. 5–19. [Gmoshinskiy I.V., Mazo V.K., Tutelyan V.A., Khotimchenko S.A. Microelement selenium: Role in life processes. *Ekologiya morya*. 2000. No. 54. Pp. 5–19. (In Rus.)]

Микроэлементозы человека / Авцын А.А., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. М., 1991. [Avtsyin A.A., Zhavoronkov A.A., Rish M.A., Strochkova L.S. *Mikroelementozy cheloveka* [Human microelementoses]. Moscow, 1991.]

Полосина А.В. Селен в почвообразующих породах и почвах Новосибирской области // Сибирский экологический журнал. 2009. Т. 2. С. 293–297.

[Polosina A.V. Selenium in soil-forming rocks and soils of the Novosibirsk region. *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal*. 2009. No. 2. Pp. 293–297. (In Rus.)]

Синдирева А.В. Критерии и параметры действия микроэлементов в системе почва–растение–животное: Дис. ... д-ра биол. наук. Тюмень, 2012. [Sindireva A.V. Kriterii i parametry deistviya mikroelementov v sisteme pochva–rastenie–zhivotnoe [Criteria and parameters of microelement action in the soil–plant–animal system]. Dr. Hab. dis. Tyumen, 2012.]

Синдирева А.В., Голубкина Н.А. Оценка селенового статуса территории Омской области // Омский научный вестник. 2011. № 1 (104). С. 192–196. [Sindireva A.V., Golubkina N.A. Estimation of the selenium status of the territory of the Omsk region. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2011. No. 1 (104). Pp. 192–196. (In Rus.)]

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. [Sindireva A.V., Kotchenko S.G., Guryev N.E. Geochemical assessment of selenium content in the main types of soils in the Tyumen region. *Problemy regionalnoy ekologii*. 2021. No. 3. Pp. 32–38. (In Rus.)]

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

Tan J., Zhu W., Wang W. et al. Selenium in soil and endemic diseases in China. *Sci. Tot. Environ*. 2002. Vol. 284. Pp. 227–235.

Статья поступила в редакцию 21.08.2022, принята к публикации 12.10.2022

The article was received on 21.08.2022, accepted for publication 12.10.2022

## Сведения об авторах / About the authors

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

**Anna V. Sindireva** – Dr. Hab. (Biology); Head at the Department of Geoecology and Nature Management of the Institute of Earth Sciences, Tyumen State University

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

E-mail: [a.v.sindireva@utmn.ru](mailto:a.v.sindireva@utmn.ru)

**Гурьев Никита Евгеньевич** – аспирант кафедры геоэкологии и природопользования Института наук о Земле; Тюменский государственный университет

**Nikita E. Guryev** – postgraduate student at the Department of Geoecology and Nature Management of the Institute of Earth Sciences, Tyumen State University

E-mail: [nikitka.gurev.1996@mail.ru](mailto:nikitka.gurev.1996@mail.ru)

### Заявленный вклад авторов

**А.В. Синдирева** – научное руководство исследованием, интерпретация результатов, подготовка текста статьи

**Н.Е. Гурьев** – сбор полевого материала, интерпретация результатов, статистическая обработка данных, подготовка текста статьи

### Contribution of the authors

**A.V. Sindireva** – scientific management of the study, interpretation of the results, preparation of the text of the article.

**N.E. Guryev** – collection of field material, interpretation of results, statistical processing of data, preparation of the text of the article

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

All authors have read and approved the final manuscript