

DOI 10.33952/2542-0720-2020-3-23-142-151

УДК 633.16 : 581.1

Симонова О. А.<sup>1</sup>, Симонов М. В.<sup>2</sup>, Товстик Е. В.<sup>2</sup>

## СОРТОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ БИОАККУМУЛЯЦИИ ЖЕЛЕЗА В РАСТЕНИЯХ ЯЧМЕНЯ

<sup>1</sup>ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого»;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»

**Реферат.** Железо относится к элементам, необходимым для полноценного развития растений, однако в избыточных концентрациях оно может оказывать токсическое действие. Цель работы – сравнительная оценка накопления железа в корнях и надземной части растений ячменя разных сортов. Исследования проведены в 2019 г. Объектами исследования служили побеги и корни ячменя сортов и форм 29-11, Фермер 198-12, Форвард, Бионик из рабочей коллекции лаборатории селекции и первичного семеноводства ячменя Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого (ФГБНУ «ФАНЦ Северо-Востока»). В качестве стандарта использовали сорт Белгородский 100. Исследования проводили в рулонной культуре на питательном растворе Кнопа с добавлением ионов железа(II) в виде  $FeSO_4 \times 7H_2O$  в концентрациях 2,6; 13,0 и 65,0 мг/л действующего вещества. В качестве контроля использовали питательный раствор Кнопа без добавления соли железа. Растения выращивали в течение 14-и суток в естественных условиях. По окончании срока экспозиции измеряли длину корней и определяли их биомассу. Исследование содержания железа в растительных пробах осуществляли на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-6800 (Shimadzu, Япония). Количество железа в корнях и побегах растений на контрольном фоне варьировало от 86,5 до 207,0 мг/кг и от 66,2 до 121,2 мг/кг соответственно. Отсутствовали достоверные различия в содержании железа в надземной и подземной частях растений ячменя у сортов Белгородский 100 и Фермер 198-12. Накопление железа в корнях растений зависело от его концентрации в питательном растворе. В побегах подобной закономерности не прослеживалось. Для всех исследованных сортов содержание железа в корнях при выращивании на средах с добавлением ионов железа(II) было выше, чем у сорта-стандарта. Максимальное количество железа в корнях (692,0; 2110,4; 7812,1 мг/кг) во всех вариантах опыта и побегах ( $157,9 \pm 9,9$  и  $215,1 \pm 20,8$  мг/кг) в дозе 2,6 и 13,0 мг/л зафиксировано у сорта Бионик. Для большинства сортов в вариантах опыта с дозой ионов железа(II) 13 и 65 мг/л фиксировали уровень концентрации железа в корнях, соответствующий токсической дозе (более 500 мг/кг). Повышение содержания железа было сопряжено с уменьшением длины корней и не отражалось на их биомассе.

**Ключевые слова:** ячмень (*Hordeum vulgare L.*), ионы железа(II), накопление железа, сорт, корни, побеги, биомасса.

### Введение

В настоящее время актуальность разработки стратегий, направленных на увеличение содержания микроэлементов в зерновых культурах, не вызывает сомнений. Прежде всего, это связано с улучшением качества продуктов питания, изготовленных на их основе [1].

Железо (Fe) является одним из важнейших биологически значимых элементов [2]. Его дефицит приводит к возникновению проблем со здоровьем у людей, в рационе питания которых преобладают зерновые культуры с низким содержанием микроэлементов [3].

Известно, что общее содержание железа в растениях зависит от активности его поглощения клетками корней, а также эффективности перемещения по растению. В большей степени железо накапливается в корнях, в меньшей степени – в стеблях и листьях [4]. Частично ограничения на поступление железа в растения накладывают свойства почвы. Так, в аэрируемых и карбонатных почвах доступность железа для растений снижается [5].

К настоящему времени известны две стратегии поглощения железа растениями в условиях его дефицита. Одна из них, не характерная для злаковых культур, заключается в подкислении корневыми экссудатами почвы в области ризосферы [6]. У злаковых растений повышение доступных форм железа в почве возможно за счет продукции ими хелатирующих агентов. Встраивание генов, отвечающих за синтез подобных веществ из злаковых культур, позволяет в настоящее время получать трансгенные линии картофеля, толерантные к низким концентрациям ионов железа [7].

В почве с кислой реакцией среды, напротив, могут создаваться условия, способствующие повышению доступности ионов железа для растений [8]. Но достаточно часто их избыток способен оказывать на растения токсическое действие. В некоторых случаях перераспределение в растениях ионов металлов, в том числе и железа, повышает их выживаемость в условиях повышенной доступности ионов [9]. В связи с этим, **цель исследований** – сравнительная оценка накопления железа в корнях и надземной части растений ячменя разных сортов.

#### **Материалы и методы исследований**

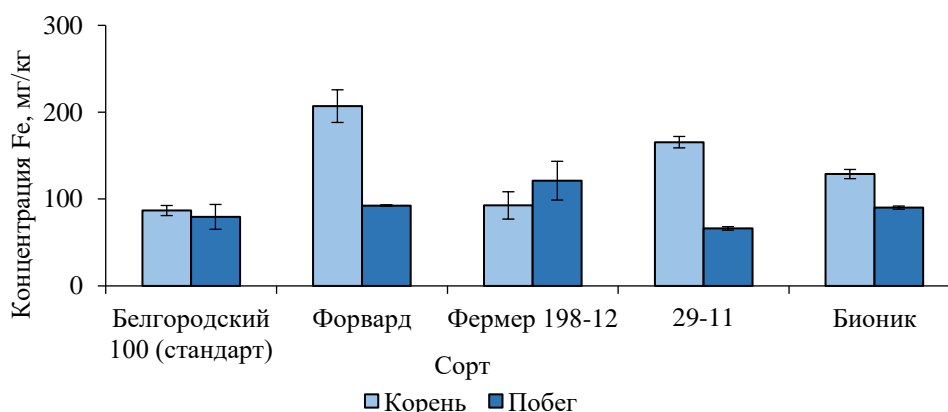
Лабораторный опыт по исследованию биоаккумуляции железа проростками ячменя проводили в 2019 г. в ФГБНУ «ФАНЦ Северо-Востока». Объектами исследования служили побеги и корни ячменя сортов 29-11, Фермер 198-12, Форвард, Бионик из рабочей коллекции лаборатории селекции и первичного семеноводства ячменя ФГБНУ «ФАНЦ Северо-Востока». В качестве стандарта использовали внесенный в Госреестр и рекомендованный для выращивания в Кировской области сорт ячменя Белгородский 100. Выращивание растений проводили в рулонной культуре на питательном растворе Кнопа ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  – 1,0;  $\text{K}_3\text{PO}_4$  – 0,25;  $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$  – 0,25;  $\text{KCl}$  – 0,125 г на 1 л воды) с добавлением ионов железа(II) в виде  $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$  в концентрациях 2,6; 13,0 и 65,0 мг/л действующего вещества. Выбор наименьшей исследуемой в опыте концентрации железа был основан на данных литературы об его оптимальном содержании в почве (2,6 мг/кг), доступного для растений [8]. Контрольным фоном служил раствор Кнопа без добавления ионов железа(II). Растения выращивали при естественной освещенности и комнатной температуре. Продолжительность опыта составила 14 сут. Эксперимент проводили в трех биологических повторностях.

По окончании срока экспозиции растения извлекали из рулонов и измеряли длину корней, делили растения на корни и побеги, определяли их биомассу после высушивания. Для оценки степени накопления железа в растениях образцы подвергали сухой минерализации согласно ГОСТ 26929-94 [10]. Определение содержания железа в растительных тканях осуществляли на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-6800 (Shimadzu, Япония), предварительно экстрагируя железо из золы раствором азотной кислоты (1:1) [11].

Статистическую обработку данных и построение графиков проводили с использованием пакета программы MS Excel. Для числовых характеристик рассчитывали средние арифметические значения и их стандартные ошибки, коэффициент корреляции ( $r$ ). Существенность различий между вариантами определяли при уровне значимости  $P \geq 0,95$  ( $P$  – доверительная вероятность).

### Результаты и их обсуждение

Известно, что химический состав зерна зависит от многих факторов. Среди них сортовая специфичность, район произрастания и другие. При прорастивании зерна его оригинальный состав может меняться [12]. При этом содержание макро- и микроэлементов в проростках зачастую определяется их исходным количеством в зерне [13]. Согласно полученным данным содержание железа в корнях и побегах 14-дневных проростков ячменя на контрольном фоне варьировало от 86,5 до 207,0 мг/кг и от 66,2 до 121,2 мг/кг соответственно (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Содержание железа в проростках ячменя на контрольном фоне**

У сортов Белгородский 100 и Фермер 198-12 отсутствовали достоверные различия в содержании железа в надземной и подземной частях растений. Для остальных исследованных сортов количество железа в корнях превышало его содержание в побегах.

По сравнению с сортом Белгородский 100 количество железа в корнях на контрольном фоне было выше в 1,5; 1,9 и 2,4 раза у сортов Бионик, 29-11 и Форвард. В надземной части растений сорта Фермер 198-12 содержание железа по сравнению с Белгородским 100 было в 1,5 раза выше.

Известно, что надземные органы растений могут содержать в среднем в 10–15 раз меньше тяжелых металлов (ТМ), чем корни [14, 15]. Это обусловлено связыванием и закреплением ионов металлов в хелатные комплексы в области ризосферы. Основная часть хелатированных ТМ остается в корне, и лишь незначительное их количество поступает в наземные органы. Способность корней задерживать большую часть тяжелых металлов является важным адаптационным механизмом, обеспечивающим нормальный рост и развитие растений в условиях высокого содержания этих элементов в почве. Внесение в питательный раствор ионов железа(II) привело к его преимущественному накоплению в корнях растений, что согласуется с литературными данными [16, 17] (таблица 1).

**Таблица 1 – Кратность превышения содержания железа в корнях растений ячменя по сравнению с побегами**

Сорт	Концентрация Fe <sup>2+</sup> , мг/л		
	Корень	Побег	Корень/Побег
Белгородский 100 (St.)	2,6	13,0	65,0
Форвард	2,2	11,4	18,4
Фермер 198-12	1,9	4,2	38,1
29-11	1,7	3,1	10,4
Бионик	7,7	28,6	6,0
Бионик	4,4	9,8	63,4

При более низких концентрациях железа в среде выращивания растений (2,6 и 13,0 мг/л) кратность превышения его накопления в корнях варьировала в пределах одного порядка (1,7–7,7 и 3,1–9,8 раз), за исключением сортов Белгородский 100 и 29-11, для которых увеличение составило 11,4 и 28,6 раз соответственно. В случае наибольшей исследуемой в опыте концентрации железа (65,0 мг/л) кратность превышения накопления относительно его более низкой концентрации (2,6 мг/л) изменилась на порядок. Исключение составил сорт 29-11, для которого отмечали снижение степени накопления железа в корнях растений по сравнению с побегами.

Для всех исследованных сортов содержание железа в корнях при выращивании на средах с добавлением ионов железа(II) было выше, чем в корнях сорта-стандарта (таблица 2).

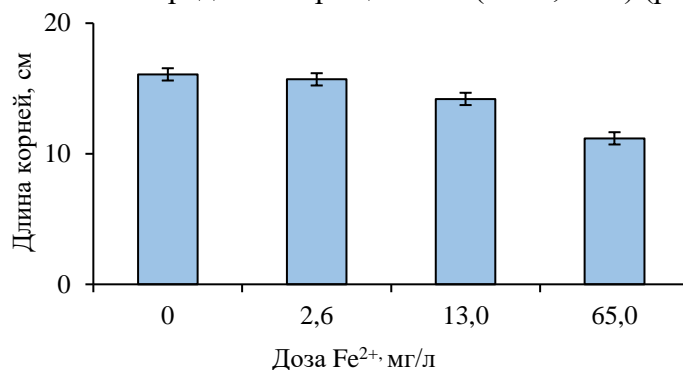
**Таблица 2 – Содержание железа в растениях ячменя, выращенных на среде с разными дозами ионов железа(II)**

Сорт	Концентрация Fe <sup>2+</sup> , мг/л	Содержание, мг/кг	
		корень	побег
Белгородский 100	2,6	183,2 ± 5,2	81,6 ± 1,4
	13,0	635,8 ± 13,1	55,7 ± 2,6
	65,0	3029,4 ± 44,7	164,6 ± 5,3
Форвард	2,6	254,2 ± 5,4	129,2 ± 5,1
	13,0	870,5 ± 19,7	206,1 ± 2,4
	65,0	5956,3 ± 56,4	156,3 ± 1,8
Фермер 198-12	2,6	231,9 ± 18,7	132,9 ± 3,9
	13,0	342,3 ± 73,0	109,3 ± 3,4
	65,0	1538,0 ± 53,3	147,2 ± 5,3
29-11	2,6	685,7 ± 13,7	88,6 ± 2,2
	13,0	2039,2 ± 114,6	71,4 ± 2,8
	65,0	622,6 ± 12,2	103,0 ± 8,2
Бионик	2,6	692,0 ± 24,0	157,9 ± 9,9
	13,0	2110,4 ± 101,8	215,1 ± 20,8
	65,0	7812,1 ± 17,6	123,3 ± 9,8

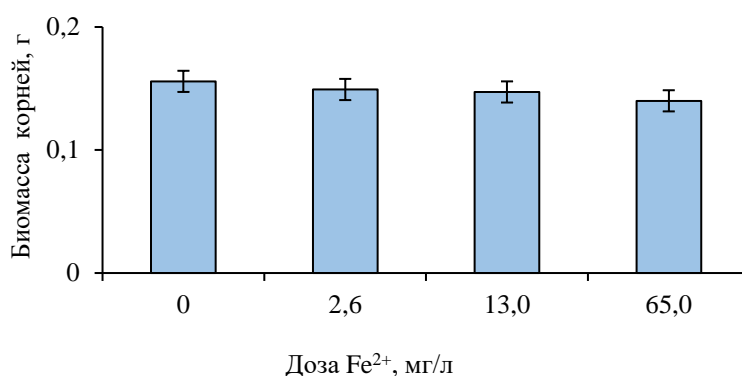
Исключение составил сорт Фермер 198-12, содержание железа в корнях которого при концентрациях элемента в питательном растворе 13,0 и 65,0 мг/л было меньше (соответственно 342,3 ± 73,0 и 1538,0 ± 53,3 мг/кг сухого веса), чем у сорта Белгородский 100 (635,8 ± 13,1 и 3029,4 ± 44,7 мг/кг).

Среди исследованных сортов максимальное накопление железа (7812,1 ± 17,6 мг/кг) в корнях зафиксировано у сорта Бионик. По содержанию железа отличие данного сорта от стандартного составило в 1,5; 3,7; 3,3 раза при выращивании на средах с 2,6; 13; 65 мг/л ионов железа(II) соответственно. Известно, что растения, способные накапливать ТМ в больших количествах, более устойчивы к соответствующей ионной токсичности [18–20]. По данным литературы концентрация железа в растениях может варьировать от 30 до 300 мг/кг их сухого веса, при этом концентрацию выше 500 мг/кг считают токсичной [21, 22]. Для большинства исследованных сортов в вариантах опыта с дозой ионов железа (II) 13,0 и 65,0 мг/л фиксировали уровень концентрации железа, соответствующий токсической дозе (более 500 мг/кг). Полученные данные хорошо согласовывались с данными по морфометрическим показателям роста растений. Так, в среднем по сортам фиксировали закономерное уменьшение длины главного корня с ростом концентрации исследуемого элемента в среде относительно контрольного варианта и наименьшей исследуемой в опыте дозы железа (P = 0,0000) (рисунок 2). В отличие от линейного роста, продуктивные показатели проростков в меньшей степени

зависели от дозы железа в среде их выращивания ( $P = 0,3104$ ) (рисунок 3).



**Рисунок 2 – Средние значения длины корней ячменя по сортам в зависимости от дозы ионов железа(II) в среде выращивания**



**Рисунок 3 – Средние значения биомассы корней ячменя по сортам в зависимости от дозы ионов железа(II) в среде выращивания**

Для всех исследованных сортов в вариантах опыта с дозой железа (II) 2,6 и 13,0 мг/л отмечали более высокое накопление железа побегами (88,6–157,9 и 71,4–215,1 мг/кг) по сравнению с сортом-стандартом ( $81,6 \pm 1,4$  и  $55,7 \pm 2,6$  мг/кг) (см. таблицу 2). При этом в варианте опыта с максимальной исследуемой дозой железа (65 мг/л) наибольшее содержание железа в надземной части растений фиксировали у сорта Белгородский 100 ( $164,6 \pm 5,3$  мг/кг) по сравнению с остальными сортами ячменя (103,0–156,3 мг/кг). Среди исследованных сортов максимальное количество железа в побегах отмечено у сорта Бионик ( $157,9 \pm 9,9$  и  $215,1 \pm 20,8$  мг/кг) в вариантах опыта с дозой ионов железа(II) 2,6 и 13,0 мг/л. Для этого же сорта в данных вариантах опыта наблюдали наибольшее накопление железа в побегах по сравнению с контрольным фоном. В случае наибольшей исследуемой в опыте дозы железа более интенсивное его накопление по сравнению с контрольным фоном отмечали для сорта Белгородский 100 (таблица 3).

**Таблица 3 – Кратность превышения содержания железа в побегах ячменя в вариантах опыта относительно контрольного фона**

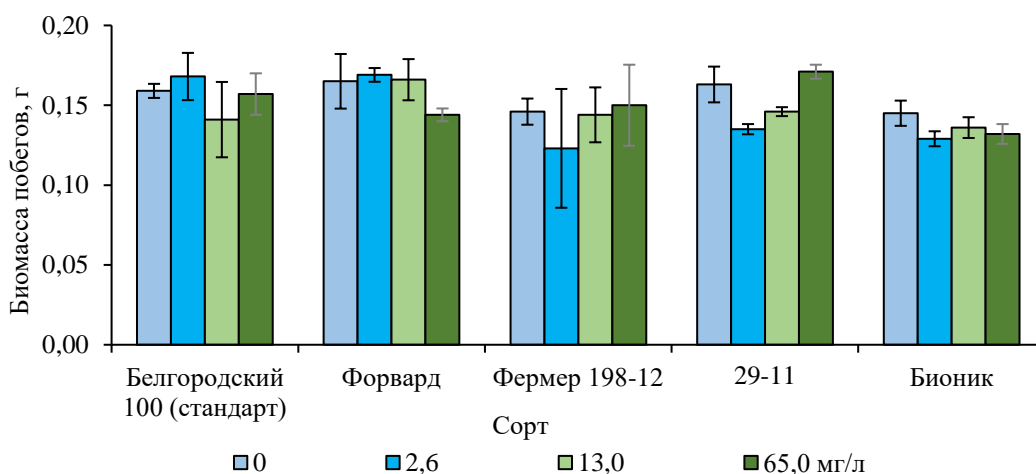
Fe <sup>2+</sup> , мг/л	Сорт				
	Белгородский 100	Форвард	Фермер 198-12	29-11	Бионик
2,6	1,0	1,4	1,1	1,3	1,8
13,0	0,7	2,2	0,9	1,1	2,4
65,0	2,1	1,7	1,2	1,6	1,4

Наименьшее содержание железа в побегах растений при максимальной

исследуемой дозе ионов железа(II) установлено для сортов 29-11 ( $103,0 \pm 8,2$ ) и Бионик ( $123,3 \pm 9,8$  мг/кг).

Согласно данным литературы, с увеличением концентрации тяжелых металлов в окружающей среде происходит повышение их содержания как в корнях, так и в надземных органах растений [23]. Для некоторых растительных видов отмечают прямую зависимость между концентрацией железа в питательном растворе и его содержанием в органах [24, 25]. В наших исследованиях подобная закономерность прослеживалась только в случае корневой системы растений. С увеличением в среде выращивания растений концентрации ионов железа(II) на один порядок (2,6 и 65,0 мг/л), регистрировали на порядок более высокое содержание железа в корнях растений. В случае побегов данная зависимость сохранялась только для сорта Белгородский 100 и частично – для 29-11 (коэффициент корреляции составил 0,92 и 0,74 соответственно). Для остальных исследованных сортов при действии минимальной дозы железа происходило более высокое накопление железа в побегах, в связи с чем уровень его накопления в исследуемом диапазоне концентраций варьировал в пределах одного порядка.

Аналогично данным, полученным по биомассе корней, общих закономерностей по влиянию на биомассу побегов ионов железа(II) в диапазоне исследуемых концентраций в целом по сортам не установлено. С ростом концентрации ионов железа(II) в среде выращивания растений отмечали как уменьшение (Форвард;  $r = -0,99$ ), так и увеличение (29-11;  $r = 0,99$ ) массы побегов (рисунок 4).



**Рисунок 4 – Биомасса растений ячменя разных сортов в зависимости от дозы ионов железа(II) в среде выращивания**

Отмечено отсутствие зависимости между данными по количеству железа в побегах и их сухой биомассой.

#### Выводы

Таким образом, в ходе исследования биоаккумуляции железа растениями ячменя разных сортов установлена зависимость между его содержанием в корнях растений и питательном растворе.

В диапазоне исследованных концентраций (2,6; 13,0; 65,0 мг/л) количество железа в корнях достигает 1000 мг/кг и превышает токсические дозы (выше 500 мг/кг сухого веса). В соответствии с данными по продуктивным показателям проростков можно заключить, что дозы железа 13,0 и 65,0 мг/л не оказывают выраженного токсического действия на растения ячменя на начальных стадиях его



развития, несмотря на его высокое накопление в корнях.

Содержание железа в побегах варьирует от 55,7 до 215,1 мг/кг. Наибольшее количество железа в побегах ( $157,9 \pm 9,9$  и  $215,1 \pm 20,8$  мг/кг в дозе 2,6 и 13,0 мг/л) и корнях ( $2110,4 \pm 101,8$  и  $7812,1 \pm 17,6$  мг/кг в дозе 13,0 и 65,0 мг/л) зафиксировано для сорта Бионик. В целом, для большинства исследованных сортов на провокационном фоне количество железа в корнях растений по сравнению с побегами было на порядок выше. На контрольном фоне у сортов Белгородский 100 и Фермер 198-12 оно достоверно не отличалось. Накопление железа в корнях растений, по сравнению с побегами, в большей степени зависело от его дозы в питательном растворе. По сравнению с сортом-стандартом у сортов 29-11, Форвард и Бионик количество железа в корнях было выше. У сорта Фермер 198-12 в вариантах опыта с концентрацией ионов железа(II) в питательном растворе 13,0 и 65,0 мг/л содержание железа было ниже, чем у сорта Белгородский 100. Накопление железа в побегах сортов 29-11, Фермер 198-12, Форвард и Бионик по сравнению со стандартным сортом оказалась выше при содержании элемента в питательном растворе 2,6 и 13,0 мг/л. При действии дозы 65,0 мг/л отмечали противоположную закономерность.

### Литература

1. Tsakirpaloglou N., Swamy B. P. M., Acuin C., Slamet-Loedin I. H. Biofortified Zn and Fe rice: potential contribution for dietary mineral and human health // Nutritional Quality Improvement in Plants // Ed. by Jaiwal P., Chhillar A., Chaudhary D., Jaiwal R. Springer, Cham, 2019. P. 1–24. DOI: 10.1007/978-3-319-95354-0\_1.
2. Celletti S., Paolacci A. R., Mimmo T., Pii Y., Cesco S., Ciaffi M., Astolfi S. The effect of excess sulfate supply on iron accumulation in three graminaceous plants at the early vegetative phase // Environmental and Experimental Botany. 2016. Vol. 128. P. 31–38. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2016.04.004.
3. Abekova A., Atabayeva S., Yernazarova G., Omirbekova N., Zhang G., Turasheva S., Asrandina S., Sarsu F., Wang Y. Mutant lines of spring wheat with increased iron, zinc, and micronutrients in grains and enhanced bioavailability for human health // BioMed Research International. 2019. Article ID 9692053. 10 p. DOI: 10.1155/2019/9692053.
4. Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants // Biochimie. 2006. Vol. 88. Iss. 11. P. 1707–1719. DOI: 10.1016/j.biochi.2006.07.003.
5. Гуторова О. А., Шеуджен А. Х. Содержание железа в лугово-черноземной почве рисовых полей в условиях Кубани // Плодородие. 2016. № 3. С. 15–18.
6. Иванищев В. В. Проблемы проникновения железа в растения // Известия Тульского государственного университета. Серия «Естественные науки». 2019. № 3. С. 139–148.
7. Nozoye T., Otani M., Senoura T., Nakanishi H., Nishizawa N. K. Overexpression of barley nicotianamine synthase 1 confers tolerance in the sweet potato to iron deficiency in calcareous soil // Plant and Soil. 2017. Vol. 418. P. 75–88.
8. Небольсин А. Н., Небольсина З. П. Теоретические основы известкования почв. СПб.: ЛНИИСХ, 2005. 252 с.
9. Литвинович А. В., Лаврищев А. В., Буре В. М., Павлова О. Ю., Ковлева А. О. Изучение динамики изменения содержания подвижного железа в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой доломитом // Агрехимия. 2019. № 3. С. 44–53.
10. ГОСТ 26929-94. Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 16 с.
11. Типсина Н. Н., Пуляева О. С. Биологическая ценность продуктов переработки ячменя // Вестник КрасГАУ. 2013. № 8. С. 226–229. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/biologicheskaya-tsennost-produktov-pererabotki-yachmenyu> (дата обращения 22.07.2020).
12. Зубцов Ю. Н., Еремина О. Ю., Серегина Н. В. Микронутриентная ценность побочных продуктов солодоращения ячменя // Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 3. С. 115–120.
13. Методические указания по определению содержания тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 2010. 42 с.
14. Krupa Z., Byszynski T. Some aspects of heavy metals toxicity towards photosynthetic apparatus – direct and indirect effects on light and dark reactions // Acta Physiol. Plant. 1995. Vol. 17. P. 177–190.
15. Kovačević G., Kastori R., Merkulov L. J. Dry Matter and Leaf Structure in Young Wheat Plants as Affected by Cadmium, Lead, and Nickel // Biologia Plantarum. 1999. Vol. 4. No. 1. P. 119–123.

16. Барсукова В. С. Физиолого-генетические аспекты устойчивости растений к тяжелым металлам. Аналитический обзор // Серия «Экология». 1997. Вып. 47. Новосибирск: СО РАН; ГПНТБ; Институт почвоведения и агрохимии. 63 с.
17. Пищик В. Н., Воробьев Н. И., Проворов Н. А., Хомяков Ю. В. Механизмы адаптации растений к тяжелым металлам // Агрофизика. 2015. № 2. С. 38–49.
18. Millaleo R., Reyes-Díaz M., Ivanov A. G, Mora M. L., Alberdi M. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2010. Vol. 10 (4). P. 470–481. DOI: 10.4067/S0718-95162010000200008.
19. Khabaz-Saberi H., Rengel Z., Wilson R., Setter T. L. Variation of tolerance to manganese toxicity in Australian hexaploid wheat // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2010. Vol. 173 (1). P. 103–112. DOI: 10.1002/jpln.200900063.
20. Li P., Song A., Li Z., Fan F., Liang Y. Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.) // Plant Soil. 2012. Vol. 354. P. 407–419. DOI: 10.1007/s11104-011-1076-4.
21. Pugh R. E., Dick D. G., Fredeen A. L. Heavy metal (Pb, Zn, Cd, Fe and Cu) contents of plant foliage near the Anvil range lead/zinc mine, Faro, Yukon territory // Ecotoxicol Environ Saf. 2002. Vol. 52. P. 273–279. DOI: 10.1006/eesa.2002.2201.
22. Adamski J. M., Peters J. A., Danieloski R., Bacarin M. A. Excess iron-induced changes in the photosynthetic characteristics of sweet potato // Journal of Plant Physiology. 2011. Vol. 168 (17). P. 2056–2062. DOI: 10.1016/j.jplph.2011.06.003.
23. Казнина Н. М. Физиолого-биохимические и молекулярно-генетические механизмы устойчивости растений семейства Poaceae к тяжелым металлам. Дисс. ... д-ра биол. наук. СПб: ФГБУН «Ботанический институт имени В. Л. Комарова», 2016. 358 с.
24. Doncheva S., Poschenrieder C., Stoyanova Z., Georgieva K., Velichkova M., Barcelly J. Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties // Environmental and Experimental Botany. 2009. Vol. 65. P. 189–197. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2008.11.006.
25. Шевякова Н. И., Ешинимаева Б. Ц., Парамонова Н. В., Кузнецов В. В. Влияние различных доз железа на развитие окислительного стресса и образование ферритина у растений хрустальной травки // Физиология растений. 2009. № 56 (4). С. 518–529.

## References

1. Tsakirpaloglou N., Swamy B. P. M., Acuin C., Slamet-Loedin I. H. Biofortified Zn and Fe rice: potential contribution for dietary mineral and human health // Nutritional Quality Improvement in Plants // Ed. by Jaiwal P., Chhillar A., Chaudhary D., Jaiwal R. Springer, Cham, 2019. P. 1–24. DOI: 10.1007/978-3-319-95354-0\_1.
2. Celletti S., Paolacci A. R., Mimmo T., Pii Y., Cesco S., Ciaffi M., Astolfi S. The effect of excess sulfate supply on iron accumulation in three graminaceous plants at the early vegetative phase // Environmental and Experimental Botany. 2016. Vol. 128. P. 31–38. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2016.04.004.
3. Abekova A., Atabayeva S., Yernazarova G., Omirbekova N., Zhang G., Turasheva S., Asrandina S., Sarsu F., Wang Y. Mutant lines of spring wheat with increased iron, zinc, and micronutrients in grains and enhanced bioavailability for human health // BioMed Research International. 2019. Article ID 9692053. 10 p. DOI: 10.1155/2019/9692053.
4. Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants // Biochimie. 2006. Vol. 88. Iss. 11. P. 1707–1719. DOI: 10.1016/j.biochi.2006.07.003.
5. Gutorova O. A., Sheudzhen K. Iron content in meadow-chernozemic soil of rice paddies in the Kuban region // Plodorodie. 2016. No. 3. P. 15–18.
6. Ivanishchev V. V. Problems of iron penetration into the plants // Izvestiya Tula State University. Natural sciences. 2019. No. 3. P. 139–148.
7. Nozoye T., Otani M., Senoura T., Nakanishi H., Nishizawa N. K. Overexpression of barley nicotianamine synthase 1 confers tolerance in the sweet potato to iron deficiency in calcareous soil // Plant and Soil. 2017. Vol. 418. P. 75–88.
8. Nebolsin A. N., Nebolsina Z. P. Theoretical basis of liming of soils. Saint-Petersburg: Leningrad Agricultural Research Institute, 2005. 252 p.
9. Litvinovich A. V., Lavrishchev A. V., Bure V. M., Pavlova O. Yu., Kovleva A. O. Studying the dynamics of mobile iron content in sod-podzolic light loam soil ameliorated by dolomite // Agricultural Chemistry. 2019. No. 3. P. 44–53.
10. GOST 26929-94. Raw material and food-stuffs. Preparation of samples. Decomposition of organic matters for analysis of toxic elements. Moscow: Publishing house of standards, 2002. 16 p.
11. Tipsina N. N., Pulyaeva O. S. The biological value of the barley processing products // The Bulletin of KrasGAU. 2013. No. 8. P. 226–229. [Electronic resource]. Access point:



<https://cyberleninka.ru/article/n/biologicheskaya-tsennost-produktov-pererabotki-yachmenya> (reference's date 22.07.2020).

12. Zubtsov Yu. N., Eremina O. Yu., Seregina N. V. The micronutrient value of byproducts of malting barley // Problems of Nutrition [Voprosy pitaniia]. 2017. Vol. 86 (3). P. 115–120.
13. Guidelines for determining the content of heavy metals in soils of agricultural land and crop production. Moscow: CINAO, 2010. 42 p.
14. Krupa Z., Baszyński T. Some aspects of heavy metals toxicity towards photosynthetic apparatus – direct and indirect effects on light and dark reactions // Acta Physiol. Plant. 1995. Vol. 17. P. 177–190.
15. Kovačević G., Kastori R., Merkulov L. J. Dry matter and leaf structure in young wheat plants as affected by cadmium, lead and nickel // Biol. Plant. 1999. Vol. 4. No. 1. P. 119–123.
16. Barsukova V. S. Physiological and genetic aspects of plant resistance to heavy metals. Analytical Review // Series “Ecology”. 1997. Vol. 47. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Russian National Public Library for Science and Technology; Institute of Soil Science and Agrochemistry. 63 p.
17. Pishchik V. N., Vorobyev N. I., Provorov N. A., Homyakov Yu. V. Mechanisms of plant adaptation to heavy metals // Agrophysica. 2015. No. 2. P. 38–49.
18. Millaleo R., Reyes-Díaz M., Ivanov A. G., Mora M. L., Alberdi M. Mn as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2010. Vol. 10 (4). P. 476–494. DOI: 10.4067/S0718-95162010000200008.
19. Khabaz-Saberi H., Rengel Z., Wilson R., Setter T. L. Variation of tolerance to manganese toxicity in Australian hexaploid wheat // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2010. Vol. 173 (1). P. 103–112. DOI: 10.1002/jpln.200900063.
20. Li P., Song A., Li Z., Fan F., Liang Y. Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.) // Plant Soil. 2012. Vol. 354. P. 407–419. DOI: 10.1007/s11104-011-1076-4.
21. Pugh R. E., Dick D. G., Fredeen A. L. Heavy metal (Pb, Zn, Cd, Fe and Cu) contents of plant foliage near the Anvil range lead/zinc mine, Faro, Yukon territory // Ecotoxicol Environ Saf. 2002. Vol. 52. P. 273–279. DOI: 10.1006/eesa.2002.2201.
22. Adamski J. M., Peters J. A., Danieloski R., Bacarin M. A. Excess iron-induced changes in the photosynthetic characteristics of sweet potato // Journal of Plant Physiology. 2011. Vol. 168 (17). P. 2056–2062. DOI: 10.1016/j.jplph.2011.06.003.
23. Kaznina N. M. Physiological, biochemical, and molecular-genetic mechanisms of the *Poaceae* family tolerance to heavy metals. Thesis... Dr. Sc. (Biol.). Saint-Petersburg: Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Science, 2016. 358 p.
24. Doncheva S., Poschenrieder C., Stoyanova Z., Georgieva K., Velichkova M., Barcelo J. Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties // Environmental and Experimental Botany. 2009. Vol. 65. P. 189–197. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2008.11.006.
25. Shevyakova N. I., Eshinimaeva B. C., Paramonova N. V., Kuznecov V. V. Effects of various iron supply on oxidative stress development and ferritin formation in the common ice plants // Plant Physiology. 2009. No. 56 (4). P. 518–529.

UDC 633.16 : 581.1

Simonova O. A., Simonov M. V., Tovstik E. V.

## VARIETAL FEATURES OF IRON BIOACCUMULATION IN BARLEY PLANTS

**Summary.** *Iron belongs to the elements necessary for plant growth and development. However, in excessive concentrations, it can have a toxic effect on them. The aim of this work was to compare the accumulation of iron in the roots and the aerial parts of different varieties of barley plants. Laboratory experiments were conducted in 2019. Shoots and roots of barley varieties and forms ‘29-11’, ‘Fermer 198-12’, ‘Forward’, ‘Bionik’ from the collection of the Laboratory of selection and primary seed production of barley of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named after N.V. Rudnitsky served as research objects. We used variety ‘Belgorodsky 100’ as a standard. The studies were carried out in a roll culture on Knop’s nutrient solution with the addition of iron (II) ions in the form of  $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$  at a concentration of 2.6, 13.0 and 65.0 mg/l of active ingredient. Knop’s nutrient solution without addition of iron salt was used as a control. The plants were grown for 14 days under natural conditions. At the end of the exposure, the length of the roots was measured; their biomass was also determined. The*

study of the iron content in plant samples was carried out on an AA-6800 atomic absorption spectrophotometer (Shimadzu, Japan). The amount of iron in the roots and shoots of plants compared to the control background varied from 86.5 to 207.0 and from 66.2 to 121.2 mg/kg, respectively. There were no significant differences in the iron content in the aboveground and underground parts of barley plants of varieties 'Belgorodsky 100' and 'Fermer 198-12'. The accumulation of iron in plant roots depended on its concentration in the nutrient solution. This pattern was not observed in the shoots. For all studied varieties, the iron content in the roots, when grown on media with the addition of iron (II) ions, was higher than that of the standard one. Variety 'Bionik' in all variants of the experiment accumulated the maximum amount of iron in the roots (692.0; 2110.44; 7812.1 mg/kg) and shoots ( $157.9 \pm 9.9$  and  $215.1 \pm 20.8$  mg/kg) at dose 2.6 and 13.0 mg/l. For most cultivars, in the variants of the experiment with a dose of iron (II) ions at the level of 13 and 65 mg/l, we recorded the level of iron concentration in the roots corresponding to the toxic dose (more than 500 mg/kg). An increase in the iron content was associated with a decrease in root length and did not affect their biomass.

**Keywords:** barley (*Hordeum vulgare* L.), iron (II) ions, iron accumulation, variety, roots, shoots, biomass.

Симонова Ольга Александровна, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник отдела эдафической устойчивости растений, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого»; 610007, Россия, Кировская область, г. Киров, ул. Ленина 166а; e-mail: simolga07@gmail.com.

Симонов Максим Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»; 610000, Россия, Кировская область, г. Киров ул. Московская, 36; e-mail: simaksim@mail.ru.

Товстик Евгения Владимировна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ЦК «Экологические технологии и системы», доцент кафедры фундаментальной химии и методики обучения химии ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»; 610000, Россия, Кировская область, г. Киров, ул. Московская, 36; e-mail: tovtik2006@inbox.ru.

Simonova Olga Aleksandrovna, Cand. Sc. (Agr.), researcher of the Department of edaphic resistance of plants, Federal Agricultural Research Center of the North-East named after N.V. Rudnitsky; 166a, Lenina str., Kirov, Kirov region, 610007, Russia; e-mail: simolga07@gmail.ru.

Simonov Maksim Vasilyevich, Cand. Sc. (Techn.), associate professor of the Department of machine building automation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vyatka State University" (FSBEI HE "VyatSU"); 36, Moskovskaya str., Kirov, Kirov region, 610000, Russia; e-mail: mv\_simonov@vyatsu.ru.

Tovstik Evgeniya Vladimirovna, Cand. Sc. (Biol.), senior researcher of the Competence Center "Ecological Technologies and Systems", associate professor of the Department of fundamental chemistry and methods of chemistry education, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vyatka State University" (FSBEI HE "VyatSU"); 36, Moskovskaya str., Kirov, Kirov region, 610000, Russia; e-mail: tovtik2006@inbox.ru.

*Дата поступления в редакцию – 18.05.2020.*

*Дата принятия к печати – 21.08.2020.*