

- Semenova E.I., Titova V.I., Mityanin I.O. Soderzhaniye tyazhelykh metallov v pochve posle raspashki zalezhi pervoy stadii suktessii [The content of heavy metals in the soil after plowing the fallow of the first stage of succession] // *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2020, no. 1-1(91), pp. 108–113.
- Sorokin A.E., Savich V.I., Yan'kova A.A. Agroekologicheskaya otsenka dernovo-podzolistoy pochvy po sodержaniyu nikelya v zavisimosti ot rN sredi i kompleksobrazovaniya [Agroecological assessment of sod-podzolic soil by nickel content depending on the pH of the environment and complexation] // *Vladimirskiy zemledelets*, 2020, no. 1(91), pp. 22–26.
- Tishkov A.A., Lukashov A.A. Leningradskaya oblast' [Leningrad region] // *Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya*. Moscow, 2010, vol. 17, 751 p.
- Trots V.B., Akhmatov D.A., Trots N.M. Vliyaniye mineral'nykh udobreniy na akkumulyatsiyu tyazhelykh metallov v pochve i fitomasse zernovykh kul'tur [The influence of mineral fertilizers on the accumulation of heavy metals in the soil and phytomass of grain crops] // *Zernovoye khozyaystvo Rossii*, 2015, no. 1, pp. 45–49.
- Fedorets N.G., Bakhmet O.N., Medvedeva M.V. Tyazhelyye metally v pochvakh Karelii [Heavy metals in soils of Karelia]. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN, 2015, 222 p.
- Khimiya tyazhelykh metallov, mysh'yaka i molibdena v pochvakh* [Chemistry of heavy metals, arsenic and molybdenum in soils] / Pod red. N. G. Zyrina, L.K. Sadovnikovoy. Moscow: Publishing House of MSU, 1985, 208 p.
- Ekologicheskaya obstanovka v Sankt-Peterburge v 1993-1994 godakh: Analit. obzor / Komitet ekologii i prirodnnykh resursov Sankt-Peterburga i Leningradskoy oblasti* [Ecological situation in St. Petersburg in 1993–1994: Analytical overview / Committee for Ecology and Natural Resources of St. Petersburg and the Leningrad Region]. Pod red. I. D. Gusakovoy. Saint-Petersburg, 1995, 236 p.
- McGrath S.P. Risk assessment of metals // Proc. Int. Conf. Soil Remediation. Hangzhou, China, 2000, pp. 1–7.

УДК 631.81

DOI:10.25695/AGRPH.2021.02.02

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ЦИНКА В РАСТЕНИЯХ ЯЧМЕНЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ ПЛОДОРОДИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

С. Е. Витковская^{1, 2}

¹ *Российский государственный гидрометеорологический университет*

192007, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79, Россия;

² *Агрофизический научно-исследовательский институт*

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14, Россия

E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 15 февраля 2021 г., принята к печати 24 мая 2021 г.

Влияние уровня плодородия дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы на динамику содержания цинка в растениях изучалось в условиях стационарного полевого эксперимента. Установлено, что содержание Zn в почве существенно возрастало при внесении органических удобрений и не зависело от дозы минеральных удобрений. Содержание Zn в вегетативных органах растений ячменя линейно убывало в течение вегетации. Скорость убывания содержания Zn (скорость биологического разбавления) в период от 27 до 81 сут. роста растений варьировалась в пределах от $-0,33 \pm 0,04$ (контрольный вариант, среднекультуренная почва) до $-0,52 \pm 0,06$ мг кг⁻¹ сут⁻¹ (вариант 2, хорошо- и высококультуренная почва). Коэффициенты вариации (v, %), характеризующие неоднородность содержания элемента в вегетативных органах растений в течение вегетации, изменялись в диапазоне 34–48%. Среднее по вариантам опыта содержание Zn в зерне ячменя варьировалось в пределах 20 ± 2 мг кг⁻¹, превышая его среднее содержание в соломе в 3,5 раза. Содержание цинка в зерне растений ячменя линейно снижалось с увеличением биомассы растений.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, органические и минеральные удобрения, цинк, ячмень, динамика, временная и пространственная неоднородность.

DYNAMICS OF ZINC CONTENT IN BARLEY PLANTS DEPENDING ON FERTILITY LEVEL OF SOD-PODZOLIC SOIL

S. E. Vitkovskaya^{1, 2}

¹ Russian State Hydrometeorological University, 79, Voronezhskaya St., Saint-Petersburg, 192007, Russia;

² Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220, Russia

E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

The effect of the sod-podzolic light loamy soil fertility level on the dynamics of zinc content in plants was studied in a stationary field experiment. It was found that Zn content in the soil was increasing significantly with the application of manure and did not depend on the rate of mineral fertilizers. Zinc content in the vegetative organs of barley plants decreased linearly during the growing season. The rate of decrease in the Zn content (rate of biological dilution) in the period from 27 to 81 days of plant growth ranged from -0.33 ± 0.04 (control treatment, soil with medium fertility level) to -0.52 ± 0.06 mg kg⁻¹ day⁻¹ (treatment 2, soil with high and above high fertility level). The coefficients of variation (v, %), characterizing the heterogeneity of the element content in the vegetative organs of plants during the growing season varied in the range of 34–48%. The average Zn content in barley grain varied in the range of 20 ± 2 mg kg⁻¹, exceeding the average content in straw 3.5 times. The zinc content in the grain of barley plants decreased linearly with an increase of plant biomass.

Keywords: sod-podzolic soil, manure, mineral fertilizer, zinc, barley, dynamics, temporal and spatial heterogeneity.

ВВЕДЕНИЕ

Жизнь любого организма, в том числе растительного, – это процесс, и, следовательно, его необходимо изучать во времени (Кузнецов, Дмитриева, 2006). Выявленные закономерности динамики роста и элементного состава растений в зависимости от различных факторов могут послужить основой для управления продукционным процессом (Витковская, 2015а, 2015б).

Элементный состав растений и неоднородность содержания химических элементов в растениях в пределах поля или одного растения формируются в процессе роста и развития растительного организма (в динамике) и зависят от многообразия факторов внешней среды, обуславливающих количество и скорость поступления химических элементов в растения, а также перераспределение их в органах и тканях растительного организма. Временная неоднородность элементного состава растений в агроэкосистемах определяется динамикой следующих процессов: 1) роста растений; 2) поступления химических элементов в растения; 3) распределения химических элементов в органах растений (Витковская, Шестакова, 2012; Витковская, 2019).

При внесении в почву органических и минеральных мелиорантов существенно изменяется элементный состав почвенного раствора и, как следствие, распределение микроэлементов в системе почва-растение (Витковская, Дричко, 2004; Kabata-Pendias, 2010; Angelova et al., 2013; Витковская, Шаврина, 2017).

Цинк (Zn) относится к числу необходимых микронутриентов и выполняет важные физиологические функции во всех живых системах, такие как поддержание структурной и функциональной целостности биологических мембран, а также облегчение синтеза белка и экспрессии генов (Alloway, 2008; Soil Fertility..., 2018), в связи с чем весьма актуальны исследования, направленные на установление закономерностей

изменения его содержания в сельскохозяйственных культурах в течение вегетации (временная неоднородность) и в зависимости от уровня плодородия почвы (искусственно созданная пространственная неоднородность в пределах агроэкосистемы). Известно (Sadeghzadeh, 2013; Alloway, 2008), что в последнее десятилетие интерес к Zn возрос вследствие широкого распространения его дефицита в различных регионах, с которым связано снижение урожайности сельскохозяйственных культур, содержания Zn в зерне злаков и качества зерна. Например, в Индии в настоящее время Zn считается четвертым по значимости для урожайности сельскохозяйственных культур питательным компонентом, недостаток которого приводит к потере до 40% урожая арахиса (Arunachalam et al., 2013). У высших растений дефицит Zn может проявляться в снижении активности губиско и, следовательно, уменьшении скорости фотосинтеза; при остром дефиците Zn верхушки побегов отмирают, что наблюдается весьма часто (Barman et al., 2018). Цинк важен для растений как на начальных этапах роста, так и в периоды формирования зерна и семян (Soil Fertility..., 2018; Васильев, 2019).

Доступный для растений Zn присутствует в почвенном растворе в форме Zn²⁺, адсорбирован на поверхностях глинистых минералов, органических и минеральных веществ. Доступность цинка снижается при высоких значениях pH (Кашин, Иванов, 1999; Soil Fertility..., 2018). Обогащение почв органическими веществами может привести к снижению содержания биодоступных металлов в результате комплексообразования (Angelova et al., 2013), однако дефицит Zn редко наблюдается в случае использования в качестве удобрения навоза, поскольку его содержание в данном органическом мелиоранте, как правило, значительно.

Цинк участвует в укреплении иммунной системы человека. Недостаток Zn в организме приводит к выпадению волос, потере памяти, проблемам с кожей, слабости мышц, задержке роста

(Hafeez et al., 2013; Prasad, 2014). Дефицит цинка может способствовать ускорению процесса старения и возникновению таких возрастных хронических заболеваний, как атеросклероз, дегенеративные заболевания нервной системы, иммунное старение и рак (Kumar et al., 2016).

Цель исследования заключалась в том, чтобы установить влияние различных доз органических и минеральных удобрений на динамику содержания цинка в растениях ячменя.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на динамику содержания цинка в растениях ячменя (*Hordeum vulgare*) сорта Ленинградский изучалось в условиях стационарного полевого эксперимента. Опыт был заложен в 2006 г. в Меньковском филиале Агрофизического института (Ленинградская область, Гатчинский район) на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. В опыте изучались три парцеллы: 1 – органические удобрения не вносились (среднеокультуренная почва); 2 – за 7 лет внесено 240 т га⁻¹ органических удобрений, 1 т га⁻¹ известки (хорошоокультуренная почва); 3 – за семь лет внесено 680 т га⁻¹ органических удобрений, 3 т га⁻¹ известки (высокоокультуренная почва). В качестве органического удобрения применялся бесподстильный навоз КРС. Парцеллы были разбиты на 3 повторности, каждая из которых включала три делянки, различавшиеся в зависимости от дозы ежегодно вносимых минеральных удобрений. Длина делянки – 43 м, ширина – 5,5 м. В 2012 г. минеральные удобрения были внесены по следующей схеме: 1 – контроль (без удобрений); 2 – N70P30K70; 3 – N90P30K90.

До внесения минеральных удобрений (май 2012 г.) почва опыта характеризовалась следующими агрохимическими параметрами: парцелла 1 – рН_{KCl} – 5,1±0,1, К₂O – 61±11 мг кг⁻¹, Р₂O₅ – 197±30 мг кг⁻¹, N-NH₄ – 2,7±0,5 мг кг⁻¹, N-NO₃ – 7±1 мг кг⁻¹, Ca – 3,8±0,1 ½ ммоль 100 г⁻¹, органическое вещество – 3,3±0,2%; парцелла 2 – рН_{KCl} – 5,8±0,3, К₂O – 124±22 мг кг⁻¹, Р₂O₅ – 324±45 мг кг⁻¹, N-NH₄ – 8±2 мг кг⁻¹, N-NO₃ – 10±4 мг кг⁻¹, Ca – 5,0±0,3 ½ ммоль 100 г⁻¹, органическое вещество – 4,5±0,3%; парцелла 3 – рН_{KCl} – 6,3±0,1, К₂O – 181±31 мг кг⁻¹, Р₂O₅ – 485±72 мг кг⁻¹, N-NH₄ – 14±4 мг кг⁻¹, N-NO₃ – 20±12 мг кг⁻¹, Ca – 6,0±0,6 ½ ммоль 100 г⁻¹, органическое вещество – 5,4±0,2%. Представлены средние значения агрохимических параметров в пределах парцелл, поскольку до внесения минеральных удобрений существенных различий по вариантам не наблюдалось.

Отбор растительных проб проводился на каждой из парцелл (2-я повторность, 3 варианта). На каждой делянке для отбора проб был выделен участок площадью 4 м². Растительные пробы отбирались в динамике (7 отборов за вегетацию) через 27, 33, 39, 46,

55, 62 и 81 сут. после посева. К последнему отбору растения ячменя достигли фазы молочной спелости. Количество растений в индивидуальной растительной пробе по мере нарастания массы изменялось от 100 до 30 шт.

Содержание цинка в растениях и почве определялось атомно-абсорбционным методом. Подвижные соединения Zn извлекались из почвы ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 4,8. Математическая обработка проводилась в программе OriginPro 7,5. В таблицах представлены средние величины и их стандартные отклонения (±).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Неоднородность биомассы и элементного состава сельскохозяйственных культур в течение вегетации определяется широким спектром факторов, важнейшими из которых в пределах отдельно взятого агрофитоценоза являются (Витковская, 2019): 1) естественная и искусственно созданная неоднородность среды обитания; 2) неоднородность посевного материала (скрытые дефекты семян, заражение семян болезнетворными организмами) и связанные с ней различия в росте и развитии каждой единицы посевного материала; 3) случайные факторы (неравномерность высева семян, поражение растений болезнями и вредителями и т. п.). Данные обстоятельства следует учитывать при оценке влияния какого-либо отдельно взятого фактора на продукционный процесс в агроэкосистеме.

Пространственную неоднородность содержания цинка по вариантам опыта характеризуют данные, представленные в табл. 1. Влияние приемов окультуривания на содержание Zn в почве оценивалось по следующим критериям: для оценки влияния различных доз органических удобрений использовалась выборка, объединяющая все три варианта опыта на каждой из парцелл; влияние различных доз минеральных удобрений оценивалось в пределах отдельно взятой парцеллы (табл. 1).

Установлено, что внесение органических удобрений оказало существенное влияние на содержание Zn в почве: валовое содержание элемента на парцеллах 2 и 3 возросло по отношению к парцелле 1 на 47 и 26% соответственно, а содержание подвижных соединений – на 97–122%. Влияния различных доз минеральных удобрений на валовое содержание Zn в почве было несущественным.

Динамика содержания Zn в растениях ячменя в период 0–81 сут. с момента высева семян хорошо аппроксимировалась линейной моделью (рис.):

$$C(t) = C_0 + bt,$$

где $C(t)$ – содержание Zn в растениях на момент времени t , мг кг⁻¹; C_0 – содержание Zn на момент 1-го отбора (27-е сутки); b – скорость убывания содержания Zn в растениях, мг (кг·сут)⁻¹. На 81-е сутки для расчета использовались данные о содержании Zn в соломе.

Таблица 1. Неоднородность содержания цинка в почве по вариантам опыта

Вариант	Zn			
	валовое содержание		содержание подвижных соединений	
	мг кг ⁻¹	v, %	мг кг ⁻¹	v, %
<i>парцелла 1 (среднеокультуренная почва)</i>				
1. Контроль (б/у)	14,5±0,9	6	0,27±0,06	22
2. N70P30K70	14,8±0,4	3	0,28±0,04	14
3. N90P30K90	14,8±0,5	3	0,37±0,07	19
<i>парцелла 2 (хорошоокультуренная почва)</i>				
1. Контроль (б/у)	19,6±1,9	10	0,62±0,12	19
2. N70P30K70	24,4±9,1	37	0,59±0,13	22
3. N90P30K90	20,7±0,8	4	0,62±0,23	37
<i>парцелла 3 (высокоокультуренная почва)</i>				
1. Контроль (б/у)	19,6±1,9	10	0,73±0,42	58
2. N70P30K70	18,5±1,9	10	0,66±0,16	24
3. N90P30K90	17,8±1,8	10	0,69±0,15	22

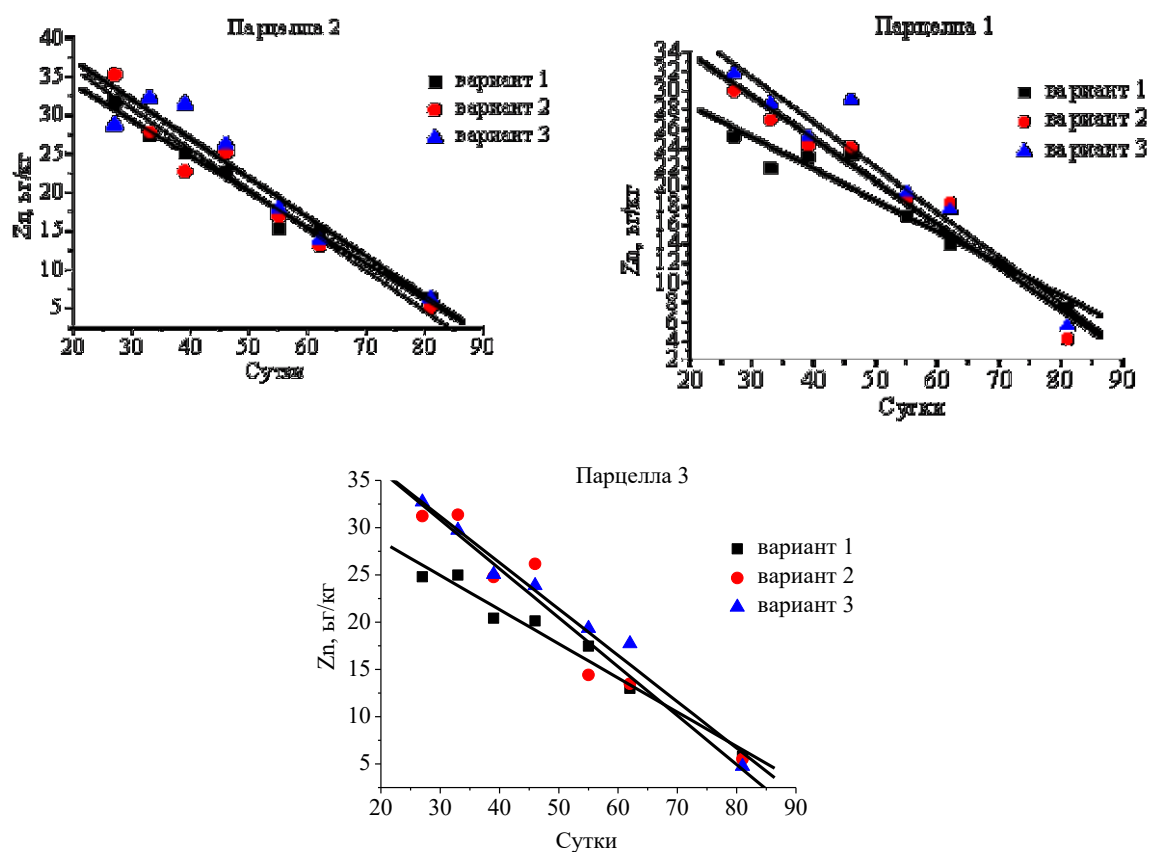


Рис. Динамика содержания цинка в вегетативных органах растений ячменя

Содержание Zn в вегетативных органах растений ячменя линейно убывало в течение вегетации (рис.): значения коэффициентов корреляции (r), характеризующих зависимость $C(Zn) = f(t)$, изменялись в пределах от $-0,95$ до $-0,99$ (критическое значение r на 5 % уровне значимости 0,754) (табл. 2).

Установлено, что скорость убывания содержания цинка (b , скорость биологического разбавления) в период от 27 до 81 сут. роста растений зависела от уровня окультуренности почвы и варьировалась в пределах от $-0,33 \pm 0,04$ (контрольный вариант, парцелла 1) до $-0,52 \pm 0,06$ мг(кг·сут) $^{-1}$ (вариант 2, парцеллы 2 и 3) (табл. 2).

Влияние органических удобрений на накопление Zn растениями можно оценить, сравнив значения b (табл. 2) и максимальные значения содержания элемента M(max) (табл. 3) в контрольных вариантах парцелл 2 и 3 с соответствующими значениями в контрольном варианте парцеллы 1 (без органических удобрений). Значимое влияние

указанного фактора на изучаемые показатели наблюдалось только на парцелле 2 (хорошоокультуренная почва): значения b и M(max) возросли в 1,4 и 1,3 раза соответственно. Влияние минеральных удобрений на скорость биологического разбавления (b) и M(max) оказалось сходным, его иллюстрируют различия в значениях b между вариантами 1 и вариантами 2 и 3, которые составили 1,3–1,4; 1,1 и 1,4 раза соответственно на парцеллах 1–3 (табл. 2).

В качестве косвенного показателя влияния органических и минеральных удобрений на динамику содержания Zn в растениях можно рассматривать коэффициенты вариации (v , %), характеризующие неоднородность содержания элемента в вегетативных органах растений в течение вегетации (табл. 3). Значения v , % изменялись в достаточно узком диапазоне 34–48%. Можно отметить четкую тенденцию к возрастанию вариабельности содержания Zn в растениях при внесении минеральных удобрений на 2–9 % (табл. 3).

Таблица 2. Параметры линейной модели, характеризующие динамику содержания цинка в растениях ячменя

Вариант	Zn	
	r^*	b (мг кг $^{-1}$ сут $^{-1}$.)
<i>парцелла 1 (среднеокультуренная почва)</i>		
1. Контроль (б/у)	-0,96	-0,33±0,04
2. N70P30K70	-0,97	-0,44±0,05
3. N90P30K90	-0,96	-0,47±0,06
<i>парцелла 2 (хорошоокультуренная почва)</i>		
1. Контроль (б/у)	-0,99	-0,46±0,02
2. N70P30K70	-0,97	-0,52±0,06
3. N90P30K90	-0,95	-0,51±0,07
<i>парцелла 3 (высокоокультуренная почва)</i>		
1. Контроль (б/у)	-0,98	-0,36±0,03
2. N70P30K70	-0,97	-0,52±0,06
3. N90P30K90	-0,99	-0,49±0,03

Примечание: критическое значение r на 5% уровне значимости 0,754.

Таблица 3. Вариационно-статистические показатели, характеризующие неоднородность содержания цинка в вегетативных органах растений в течение вегетации

Вариант	n	M	±σ	min	max	v , %*
<i>парцелла 1 (среднеокультуренная почва)</i>						
Вариант 1 (б/у)	7	19,0	6,4	7,6	25,3	34
Вариант 2	7	21,0	8,5	4,2	30,1	40
Вариант 3	7	22,5	9,1	5,6	31,8	40
<i>парцелла 2 (хорошоокультуренная почва)</i>						
Вариант 1 (б/у)	7	20,6	8,7	6,3	31,8	42
Вариант 2	7	21,0	10,0	5,2	35,4	48
Вариант 3	7	22,4	9,9	6,3	32,3	44
<i>парцелла 3 (высокоокультуренная почва)</i>						
Вариант 1 (б/у)	7	18,1	6,8	5,8	25,0	38
Вариант 2	7	21,0	9,9	5,5	31,4	47
Вариант 3	7	21,9	9,2	4,8	32,7	42

Итогом накопления биомассы растений ячменя в процессе вегетации является распределение химических элементов между вегетативными и генеративными органами (Витковская, 2015 (1)).

Содержание Zn в соломе и зерне существенно различалось (табл. 4) и зависело от применения как органических (варианты 1), так и минеральных (варианты 2 и 3) удобрений.

Таблица 4. Содержание цинка в соломе и зерне растений ячменя на момент уборки, мг кг⁻¹ а.с.в.

Вариант	Солома	Зерно	Биомасса воздушно-сухая, г/30 шт.
<i>парцелла 1 (среднеокультуренная почва)</i>			
Вариант 1 (б/у)	7,6	23,4	203
Вариант 2	4,2	20,7	277
Вариант 3	5,6	20,8	389
<i>парцелла 2 (хорошоокультуренная почва)</i>			
Вариант 1 (б/у)	6,3	21,9	252
Вариант 2	5,2	20,7	459
Вариант 3	6,3	19,6	383
<i>парцелла 3 (хорошоокультуренная почва)</i>			
Вариант 1 (б/у)	5,8	19,8	192
Вариант 2	5,5	16,6	520
Вариант 3	4,8	18,0	480

Среднее по всем вариантам опыта содержание Zn в зерне ячменя варьировалось в пределах 20±2 мг кг⁻¹, превышая его среднее содержание в соломе в 3,5 раза. Наиболее высокие показатели содержания Zn в соломе и зерне ячменя отмечены в контрольном варианте парцеллы 1 (табл. 4). Внесение органических удобрений привело к снижению содержания Zn в соломе на 16 и 24 %, в зерне — на 7 и 15 % (контрольные варианты парцелл 2 и 3 по отношению к контролю парцеллы 1 соответственно). На всех парцеллах при внесении минеральных удобрений (варианты 2 и 3) содержание цинка в соломе и зерне снижалось по отношению к варианту 1 (табл. 4). Эффекты биологического разбавления и перераспределения химических элементов между вегетативными и генеративными органами растений иллюстрирует линейная зависимость:

$$C(\text{Zn}) = f(M),$$

где $C(\text{Zn})$ – содержание цинка в мг кг⁻¹ сухой массы; M – воздушно-сухая биомасса.

Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость содержания цинка в зерне и соломе растений ячменя от их биомассы, составили –0,731 и –0,440 соответственно при критическом значении r на 5% уровне значимости 0,666. Однако следует отметить, что в конечном итоге относительные (по отношению к контролю) увеличение биомассы и снижение содержания Zn существенно различались. Например, максимальное значение биомассы, в 2,7 превышающее соответствующее значение в контрольном варианте, отмечено в варианте 2 парцеллы 3, что соответствует снижению содержания Zn зерне не более чем в 1,2 раза (табл. 4).

ВЫВОДЫ

1. Содержание цинка в почве существенно возрастало при внесении органических удобрений и не зависело от дозы минеральных удобрений.

2. Содержание Zn в вегетативных органах растений ячменя линейно убывало в течение вегетации. Коэффициенты корреляции (r), характеризующие зависимость $C(\text{Zn}) = f(t)$, изменялись в пределах от –0,95 до –0,99.

3. Скорость убывания содержания Zn (b , скорость биологического разбавления) в период от 27 до 81 сут. роста растений зависела от применения минеральных и органических удобрений и варьировалась в пределах от –0,33±0,04 (контрольный вариант, среднеокультуренная почва) до –0,52±0,06 мг кг⁻¹сут⁻¹ (вариант 2, хорошо- и высокоокультуренная почва).

4. Коэффициенты вариации (v , %), характеризующие неоднородность содержания элемента в вегетативных органах растений в течение вегетации, изменялись в достаточно узком диапазоне 34–48%; вариабельность содержания Zn в растениях при внесении минеральных удобрений возрастала на 2–9%.

5. Среднее по вариантам опыта содержание Zn в зерне ячменя варьировалось в пределах 20±2, превышая его среднее содержание в соломе в 3,5 раза. Внесение органических и минеральных удобрений привело к снижению содержания Zn в соломе и зерне.

6. Коэффициенты корреляции, характеризующие линейную зависимость содержания цинка в зерне и соломе растений ячменя от их биомассы (эффект биологического разбавления), составили –0,731 и –0,440 соответственно при критическом значении r на 5% уровне значимости 0,666.

Список литературы

- Васильев Д.В. Влияние разных концентраций цинка в почве на семенное потомство ячменя // Научное обозрение. Биологические науки. 2019. № 2. С. 30–34.
- Витковская С.Е., Дричко В.Ф. Влияние компоста из твердых бытовых отходов на урожай зерновых культур и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы // *Агрохимия*. 2004. № 6. С. 35–41.
- Витковская С.Е., Шестакова Е.В. Неоднородность роста и развития растений ячменя в условиях полевых и модельных экспериментов // *Агрохимия*. 2012. № 4. С. 51–59.
- Витковская С.Е. Закономерности формирования биомассы и элементного состава растений ячменя в полевом опыте // *Агрохимия*. 2015. № 1. С. 63–72 (1).
- Витковская С.Е. Закономерности динамики выноса питательных веществ растениями ячменя в полевом опыте // *Агрохимия*. 2015. № 5. С. 38–45 (2).
- Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на накопление цинка растениями озимой ржи // *Агрофизика*. 2017. № 3. С. 4–12.
- Витковская С.Е. Методы оценки пространственной и временной неоднородности биомассы и элементного состава сельскохозяйственных культур. СПб.: АФИ, 2019. 92 с.
- Кашин В.К., Иванов Г.М. Цинк в почвах Забайкалья // *Почвоведение*. 1999. № 3. С. 318–325.
- Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений: Учебн. изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2006. 742 с.
- Alloway B. Zinc in Soils and Crop Nutrition. Second edition, published by IZA and IFA Brussels, Belgium and Paris, France, 2008, 155 p.
- Angelova V.R., Akova V.I., Artinova N.S., Ivanov K.I. The effect of organic a mendments on soil chemical characteristics // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2013, vol. 19, no. 5, pp. 958–971.
- Arunachalam P., Kannan P., Prabukumar G., Govindaraj M. Zinc deficiency in Indian soils with special focus to enrich zinc in peanut // *African Journal of Agricultural Research*, 2013, vol. 8 (50), pp. 6681–6688.
- Barman H., Das S.K., Roy A. Zinc in Soil Environment for Plant Health and Management Strategy // *Universal Journal of Agricultural Research*, 2018, vol. 6 (5), pp. 149–154.
- Hafeez B., Khanif Y.M., Saleem M. Role of Zinc in Plant Nutrition – A Review // *American Journal of Experimental Agriculture*, 2013, vol. 3 (2), pp. 374–391.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th edition. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2010, 548 p.
- Kumar V., Kumar A., Singh S.K., Tripathi S.K., Kumar D., Singh R., Dwivedi S. Zinc Deficiency and Its Effect on the Brain: An Update // *International Journal of Molecular Genetics and Gene Therapy*, 2016, vol. 1.1, pp. 1–7.
- Prasad A.S. Zinc in humans: health disorders and therapeutic effect // *Mikroelementy v meditsine*, 2014, no. 15(1), pp. 3–12.
- Sadeghzadeh B. A review of zinc nutrition and plant breeding // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, vol. 13(4), pp. 905–927.
- Soil Fertility Handbook / Munroe J., Brown Ch., Kessel Ch., Verhallen A., Lauzon J., O'Halloran I., Bruulsema T., Cowan D. Publication 611, 3rd edition. Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (OMAFRA), 2018, 256 p.
- Soil Fertility and Fertilizer Management Strategy for Myanmar. International fertilizer development center, USA, 2018, 79 p.

References

- Vasil'yev D.V. Vliyaniye raznykh kontsentratsiy tsinka v pochve na semennoye potomstvo yachmenya [Influence of different zinc concentrations in soil on seed barley] // *Nauchnoye obozreniye. Biologicheskkiye nauki*, 2019, no. 2, pp. 30–34.
- Vitkovskaya S.E., Drichko V.F. Vliyaniye komposta iz tverdykh bytovykh otkhodov na urozhay zernovykh kul'tur i agrokhimicheskiye svoystva dernovo-podzolistoy pochvy [The effect of garbage compost on the yield of cereal crops and agrochemical properties of sod-podzolic soil] // *Agrokhimiya*, 2004, no. 6, pp. 35–41.
- Vitkovskaya S.E., Shestakova E.V. Neodnorodnost' rosta i razvitiya rasteniy yachmenya v usloviyakh polevykh i model'nykh eksperimentov [Heterogeneity of barley growth and development in field and model experiments // *Agrokhimiya*, 2012, no. 4, pp. 51–59.
- Vitkovskaya S.E. Zakonomernosti formirovaniya biomassy i elementnogo sostava rasteniy yachmenya v polevom opyte [Patterns of formation of biomass and the elemental composition of barley plants in a field experiment] // *Agrokhimiya*, 2015, no. 1, pp. 63–72.
- Vitkovskaya S.E. Zakonomernosti dinamiki vynosa pitatel'nykh veshchestv rasteniyami yachmenya v polevom opyte [Patterns of dynamics of the nutrient removal by barley plants in the field experiment] // *Agrokhimiya*, 2015, no. 5, pp. 38–45.
- Vitkovskaya S.E., Shavrina K.F. Vliyaniye razlichnykh doz organicheskikh i mineral'nykh udobreniy na nakopleniye tsinka rasteniyami ozimoy rzhi [The effect of various doses of manure and mineral fertilizers on the accumulation of zinc in winter rye plants] // *Agrofizika*, 2017, no. 3, pp. 4–12.
- Vitkovskaya S.E. *Metody otsenki prostranstvennoy i vremennoy neodnorodnosti biomassy i elementnogo sostava sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Methods for assessing the spatial and temporal heterogeneity of biomass and the elemental composition of crops]. Saint-Petersburg: ARI, 2019, 92 p.

- Kashin V.K., Ivanov G.M. Tsink v pochvakh Zabaykal'ya [Zinc in soils of the Transbaikal Region] // *Pochvovedeniye*, 1999, no. 3, pp. 318–325.
- Kuznetsov V.V., Dmitriyeva G.A. *Fiziologiya rasteniy* [Plant physiology]: Uchebn. izd. 2-ye, pererab. i dop. Moscow: Vyssh. Shk., 2006, 742 p.
- Alloway B. Zinc in Soils and Crop Nutrition. Second edition, published by IZA and IFA Brussels, Belgium and Paris, France, 2008, 155 p.
- Angelova V.R., Akova V.I., Artinova N.S., Ivanov K.I. The effect of organic a mendments on soil chemical characteristics // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2013, vol. 19, no. 5, pp. 958–971.
- Arunachalam P., Kannan P., Prabukumar G., Govindaraj M. Zinc deficiency in Indian soils with special focus to enrich zinc in peanut // *African Journal of Agricultural Research*, 2013, vol. 8 (50), pp. 6681–6688.
- Barman H., Das S.K., Roy A. Zinc in Soil Environment for Plant Health and Management Strategy // *Universal Journal of Agricultural Research*, 2018, vol. 6 (5), pp. 149–154.
- Hafeez B., Khanif Y.M., Saleem M. Role of Zinc in Plant Nutrition – A Review // *American Journal of Experimental Agriculture*, 2013, vol. 3 (2), pp. 374–391.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th edition. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2010, 548 p.
- Kumar V., Kumar A., Singh S.K., Tripathi S.K., Kumar D., Singh R., Dwivedi S. Zinc Deficiency and Its Effect on the Brain: An Update // *International Journal of Molecular Genetics and Gene Therapy*, 2016, vol. 1.1, pp. 1–7.
- Prasad A.S. Zinc in humans: health disorders and therapeutic effect // *Mikroelementy v meditsine*, 2014, no. 15 (1), pp. 3–12.
- Sadeghzadeh B. A review of zinc nutrition and plant breeding // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, vol. 13(4), pp. 905–927.
- Soil Fertility Handbook / Munroe J., Brown Ch., Kessel Ch., Verhallen A., Lauzon J., O'Halloran I., Bruulsema T., Cowan D. Publication 611, 3rd edition. Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (OMAFRA), 2018, 256 p.
- Soil Fertility and Fertilizer Management Strategy for Myanmar. International fertilizer development center, USA, 2018, 79 p.

УДК 631.51.001

DOI:10.25695/AGRPH.2021.02.03

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ОПТИМАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ СЛОЖЕНИЯ ПОЧВЫ В ЛЮБОЙ ПЕРИОД ВЕГЕТАЦИИ

А. А. Конищев, И. И. Гарифуллин

*Ивановский НИИСХ – филиал Верхневолжского ФАНЦ
153506, Ивановская обл., Ивановский р-н, с. Богородское, ул. Центральная, 2
E-mail aleksei.konishchev2010@yandex.ru*

Поступила в редакцию 15 февраля 2021 г., принята к печати 24 мая 2021 г.

Используемые в России и странах бывшего СССР значения «оптимальной плотности» почвы определены для плотности, усредненной по всей глубине пахотного слоя на момент готовности почвы к посеву. Принятые при их определении допущения и ограничения к настоящему времени превратились в сдерживающий фактор на пути совершенствования технологий обработки почвы, в частности при переходе к минимизированным обработкам. Предложена методика расчета величины «оптимальной плотности» для любой интересующей исследователя фазы развития растения, а также любого по глубине залегания слоя и способа обработки. Методика предусматривает следующий порядок действий: получение экспериментальных данных о зависимости урожайности исследуемой культуры от плотности в интересующем слое почвы в изучаемую фазу развития; аппроксимация полученных данных полиномом второй степени; исследование полученной функции на экстремум. Точка максимума функции будет являться искомой величиной. Проверка полученных данных осуществляется при помощи методов математической статистики. Предлагаемая методика апробирована на посевах яровых зерновых, что позволило установить, что с математической точки зрения урожайность достоверно зависит от плотности почвы в слое, расположенном глубже уровня размещения семян при посеве, в период вегетации растений «кущение – выход в трубку». Методика позволяет установить величину плотности, обеспечивающую максимальную урожайность возделываемой культуры в условиях агротехнических опытов. Полученные результаты могут использоваться для разработки новых технологий или объективной оценки влияния плотности сложения почвы на урожайность возделываемых культур при применении известных технологий.

Ключевые слова: плотность почвы, влажность почвы, глубина залегания слоя, период вегетации, урожайность яровой пшеницы.