

УДК 631.423.3:633.22
DOI 10.30914/2411-9687-2023-9-4-389-395

МИГРАЦИЯ ФОСФОРА ПО ГРАДИЕНТУ «ПОЧВА-РАСТЕНИЕ»

Е. С. Закамская

Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола, Российская Федерация,

Аннотация. Введение. Фосфор относится к основным биогенным элементам и необходим всем живым организмам. Почвенное плодородие зависит от количества необходимых веществ и их доступности для растений. Обеспеченность почвы республики подвижным фосфором составляет 170,7 мг/кг. Биологический вынос питательных веществ определяет качество продукции растениеводства, предназначенной для животноводства. Одним из широко используемых в злаково-бобовых травосмесях видов является ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.). В связи с этим **целью** нашей работы явилось изучение содержания подвижного фосфора в почве и накопление его растениями ежи сборной. **Материал и методы исследований.** Пробные площади были заложены на суходольных лугах Республики Марий Эл. Отбор почвенных проб и пробоподготовка проводились согласно ГОСТу 17.4.4.02-2017. Подвижный фосфор в почве определяли по методу Чирикова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26210-91). Содержание фосфора в надземных органах ежи сборной определяли спектрофотометрически по «синему» фосфорномолибденовому комплексу. Были рассчитаны коэффициенты биологического поглощения и перехода. **Результаты исследования, обсуждения.** Концентрация подвижного фосфора в почве варьирует от 40 до 230 мг/кг; содержание общего фосфора в еже сборной составило 0,545, 1,389, 1,099 мг/% на ПП 1, 2, 3 соответственно. В корнях содержание общего фосфора варьирует в пределах 0,078–0,225 мг/%, в стеблях – 0,134–0,360 мг/%; в листьях – 0,135–0,387 мг/%; в соцветиях – 0,198–0,425 мг/%. **Заключение.** Содержание фосфора зависит от конкретной территории, органа растения и от совместного действия этих факторов. В растениях происходит увеличение аккумуляции общего фосфора от корней к соцветиям. Биологическое поглощение фосфора средневозрастными растениями ежи сборной обратно пропорционально содержанию этих элементов в почве.

Ключевые слова: почва, фосфор, ежа сборная, органы растения

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Закамская Е. С. Миграция фосфора по градиенту «почва-растение» // Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». 2023. Т. 9. № 4. С. 389–395. DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2023-9-4-389-395>

MIGRATION OF PHOSPHORUS ALONG THE SOIL-PLANT GRADIENT

E. S. Zakamskaya

Mari State University, Yoshkar-Ola, Russian Federation

Abstract. Introduction. Phosphorus is one of the main biogenic elements and is necessary for all living organisms. Soil fertility depends on the amount of necessary elements and their availability to plants. The availability of mobile phosphorus in the republic's soil is 170.7 mg/kg. The biological removal of nutrients determines the quality of crop production intended for animal husbandry. One of the species widely used in cereal and legume mixtures is cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.). In this regard, the **purpose** of our work was to study the content of mobile phosphorus in the soil and its accumulation by *Dactylis glomerata* plants. **Materials and methods.** Trial plots were laid on the dry meadows of the Republic of Mari El. Soil sampling and sample preparation were carried out according to GOST 17.4.4.02-2017. Mobile phosphorus in the soil was determined by the Chirikov method in the modification of the TsINAО (GOST 26210-91). The phosphorus content in the aboveground organs of *Dactylis glomerata* was determined spectrophotometrically by the "blue" phosphor-molybdenum complex. The coefficients of biological absorption and transition were calculated. **Research results and discussion.** The concentration of mobile phosphorus in the soil varies from 40 to 230 mg/kg; total phosphorus in *Dactylis glomerata* was 0.545, 1.389, 1.099 mg/% at PP 1, 2, 3, respectively. In the roots, the total phosphorus content varies between 0.078–0.225 mg/%, in stems – 0.134–0.360 mg/%; in leaves – 0.135–0.387 mg/%; in inflorescences – 0.198–0.425 mg/%. **Conclusion.** The phosphorus content depends on the specific territory, the plant organ and on the combined action of these

factors. In plants, there is an increase in the accumulation of total phosphorus from the roots to the inflorescences. The biological absorption of phosphorus by medium-aged plants of *Dactylis glomerata* is inversely proportional to the content of these elements in the soil.

Keywords: soil, phosphorus, *Dactylis glomerata*, plant organs

The author declares no conflict of interest.

For citation: Zakamskaya E. S. Migration of phosphorus along the soil-plant gradient. *Vestnik of the Mari State University. Chapter "Agriculture. Economics"*, 2023, vol. 9, no. 4, pp. 389–395. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2023-9-4-389-395>

Введение

Фосфор относится к основным биогенным элементам и необходим всем живым организмам. Фосфор – важный компонент аденозинтрифосфата – основного источника энергии в клетке. Фосфолипиды играют важную роль в клеточных мембранах. Обеспеченность растений фосфором влияет на процессы фотосинтеза, цветения, плодоношения, деления клеток и роста меристематических тканей, процессы фиксации азота [1; 12]. У животных фосфор входит в состав соединительной ткани. Помимо влияния фосфора на растения, этот элемент необходим и животным, которые получают его с растительными кормами. Почвенный покров Медведевского района Республики Марий Эл, где проводились исследования, представлен в основном дерново-подзолистыми, малогумусными бедными почвами, характерными для юга таежно-лесной зоны Европейской части России [2]. По данным В. Р. Габдуллина и Л. А. Гараевой [2], обеспеченность почвы республики подвижным фосфором составляет в среднем 170,7 мг/кг. Почвенное плодородие зависит не только от количественного содержания необходимых элементов, но и от их доступности для растений [3]. Несмотря на всю важность для нормального роста растений и обмена веществ, фосфор является одним из наименее доступных питательных веществ. Более того, во многих почвах значительная доля общего количества почвенного Р находится в органической форме, и эти формы непосредственно недоступны растениям [10; 11]. Фосфор поступает в корневую систему и функционирует в растении в виде окисленных соединений, главным образом остатков ортофосфорной кислоты ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) [5]. Биологический вынос питательных веществ определяет качество продук-

ции растениеводства, предназначенной для животноводства [6]. Одним из широко используемых в злаково-бобовых травосмесях видов является ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) [7; 8].

В связи с этим целью нашей работы явилось изучение содержания подвижного фосфора в почве и накопление его растениями ежи сборной.

Материал и методы исследований

Три пробные площади (ПП) были заложены на суходольных лугах около села Азаново Медведевского района Республики Марий Эл. Отбор почвенных проб и пробоподготовка проводилась согласно ГОСТу 17.4.4.02-2017¹. На каждой ПП в 100 м² выкапывали по 10 средневозрастных генеративных растений ежи сборной. Подвижный фосфор в почве определяли по методу Чирикова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26210-91)². Содержание фосфора в надземных органах ежи сборной определяли спектрофотометрически по «синему» фосфорномолибденовому комплексу [1].

Для характеристики переноса вещества из почвы в растения был рассчитан коэффициент транслокации или коэффициент биологического поглощения Кб как отношение содержания (концентрации) элемента в организме к содержанию (концентрации) его в окружающей среде [9]. Для определения интенсивности накопления фосфора надземными органами ежи сборной

¹ ГОСТ 17.4.4.02-2017 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Введ. 01.01.2019. – М.: Стандартинформ, 2018. 12 с.

² ГОСТ 26204-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО. Введ. 1993-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1992. 7 с.

нами был рассчитан коэффициент перехода как отношение содержания элемента в надземных органах к таковому в корнях.

Определение онтогенетических состояний ежи сборной проводили на основе диагнозов онтогенетических состояний [4].

Экспериментальные данные, полученные в результате проведенных исследований, обрабатывались статистически с использованием программы MS Excel.

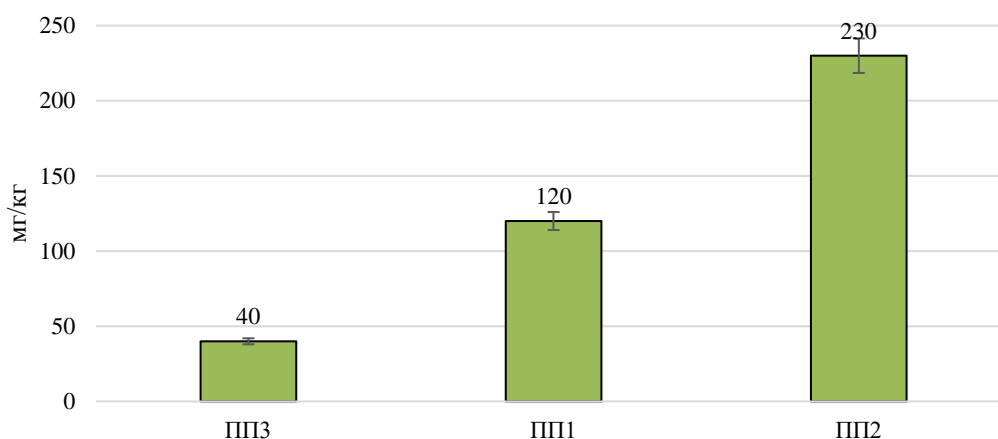


Рис. 1. Содержание подвижного фосфора в почве /
Fig. 1. The content of mobile phosphorus in the soil

Однофакторный дисперсионный анализ позволил установить зависимость содержания подвижного фосфора в почве от места отбора проб ($P = 2,6 \cdot 10^{-7}$).

Анализ результатов показал, что содержание общего фосфора в еже сборной, произрастающей на разных пробных площадях, сильно варьирует. В целом содержание этого элемента в растениях ежи сборной минимально у особей, растущих на ПП 1. Причем эта закономерность наблюдается для всех органов. Наибольшие значения суммарного содержания общего фосфора зафиксированы у растений, растущих на ПП 2. В этом районе содержание общего фосфора в почве максимально по сравнению с другими районами исследования. Содержание фосфора в еже сборной составило 0,545, 1,389, 1,099 мг/% на ПП 1, 2, 3 соответственно. Разница статистически значима ($P < 0,05$). Корреляционной зависимости между подвижным фосфором в почве и фосфором в растениях не наблюдалось ($r = 0,42$).

Результаты проведенных исследований по содержанию общего фосфора в корнях, листьях,

Результаты и их обсуждение

Фосфор – распространенный в природе элемент, встречающийся главным образом в апатитах в виде ортофосфата. В исследованных пробах почвы содержание этого элемента сильно варьирует – если на ПП 3 его содержится $40 \pm 1,7$ мг/кг, то на ПП 1 почти в 6 раз больше (рис. 1). В результате множественных сравнений выявлены значимые различия между содержанием подвижного фосфора в почве между всеми пробными площадями ($P < 0,05$).

стеблях и соцветиях ежи сборной представлены на рисунке 2. Если рассматривать распределение этого макроэлемента по органам ежи сборной, то можно заметить некую закономерность, а именно увеличение содержания общего фосфора от корней к соцветиям. Фосфор легко перераспределяется между органами растения, оттекая из стареющих листьев к молодым, много его в семенах (в составе фитина) и в меристематических тканях растений [10].

Однако следует заметить, что полного тождества не наблюдается, и во всех случаях имеют место свои особенности. На ПП 1 содержание общего фосфора распределяется следующим образом: корни < стебли < листья < соцветия. Однако разница по содержанию общего фосфора в листьях и стеблях статистически незначима (табл. 1). У растений ежи сборной, растущих на ПП 2, мы видим такую же закономерность (рис. 2). Тем не менее в данном случае есть и отличия: нет значимой разницы не только по содержанию этого элемента между листьями и стеблями, но и между листьями и соцветиями.

Результаты множественных сравнений содержания общего фосфора в растениях *Dactylis glomerata* (крит. Шеффе) / The results of multiple comparisons of the total phosphorus content in *Dactylis glomerata* plants (crit. Scheffe)

ПП 1			
	Корни / Roots	Листья / Leaves	Стебли / Stems
корни			
листья	$2,5 \cdot 10^{-07}$		
стебли	$2,7 \cdot 10^{-07}$	0,28	
соцветия	$1,3 \cdot 10^{-08}$	$1,7 \cdot 10^{-07}$	$1,61 \cdot 10^{-07}$
ПП 2			
корни			
листья	0,001		
стебли	$9,1 \cdot 10^{-05}$	0,053	
соцветия	$3,4 \cdot 10^{-09}$	0,32	$2,5 \cdot 10^{-09}$
ПП 3			
корни			
листья	0,001		
стебли	0,09	0,0006	
соцветия	$3,4 \cdot 10^{-09}$	$3,0 \cdot 10^{-05}$	$2,5 \cdot 10^{-09}$

У растений ежи сборной, растущих на ПП 3, несмотря на то что в почве наблюдается самое малое среди исследованных районов содержание общего фосфора в почве, самое высокое его содержание в корнях по сравнению с таковым показателем в дру-

гих районах. И здесь распределение общего фосфора по органам растения несколько иное, чем в предыдущих двух случаях: стебли < корни < листья < соцветия. И разница незначима между значениями содержания фосфора в корнях и стеблях.

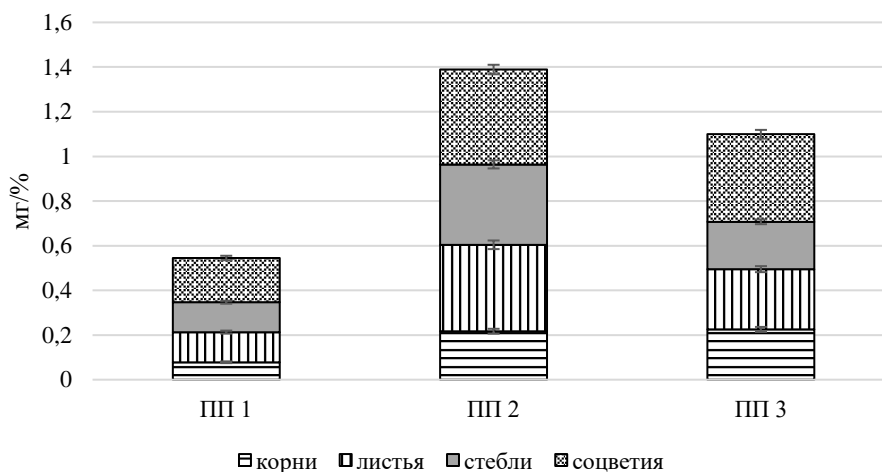


Рис. 2. Содержание фосфора в разных органах *Dactylis glomerata* / Fig. 2. Phosphorus content in different organs of *Dactylis glomerata*

Статистически значимые различия были между содержанием общего фосфора в стеблях ежи сборной, произрастающей на ПП 2, ПП 1 и на ПП 3.

Для выявления факторов, оказывающих влияние на содержание фосфора в еже сборной, был проведен двухфакторный дисперсионный анализ.

В результате он показал, что содержание этого элемента зависит от ПП, органа растения и от совместного действия этих факторов (табл. 2).

Значимость того или иного химического элемента для живого организма оценивается коэффициентом биологического поглощения.

Таблица 2 / Table 2

Результаты дисперсионного анализа содержания общего фосфора в растениях *Dactylis glomerata* /
Results of dispersion analysis of total phosphorus content in *Dactylis glomerata* plants

Источник вариации / Source of variation	SS	df	MS	F	P-знач.	F крит.
ПП	0,27583	2	0,13791	14910,1	7,31E-38	3,4028
Орган	0,12655	3	0,04218	4560,45	3,35E-33	3,0087
Взаимодействие	0,02989	6	0,00498	538,594	2,31E-24	2,5081
Внутри	0,00022	24	9,25E-06			
Итого	0,43250	35				

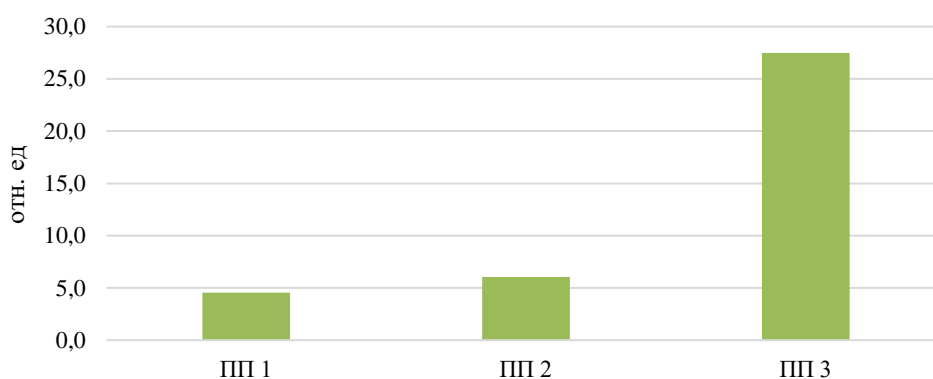


Рис. 3. Коэффициент биологического поглощения фосфора растениями *Dactylis glomerata* /
Fig. 3. Coefficient of biological phosphorus absorption by *Dactylis glomerata* plants

По содержанию фосфора в почве пробные площади, на которых проводились исследования, располагаются в следующей последовательности: ПП 2 > ПП 1 > ПП 3. Значения же коэффициентов биологического поглощения располагаются в обратном порядке (рис. 3), т. е. чем

больше фосфора содержится в почве, тем в меньшем количестве его поступает в растения.

Интенсивность аккумуляции фосфора растениями ежи сборной характеризует коэффициент перехода этого элемента из корней в надземные органы.

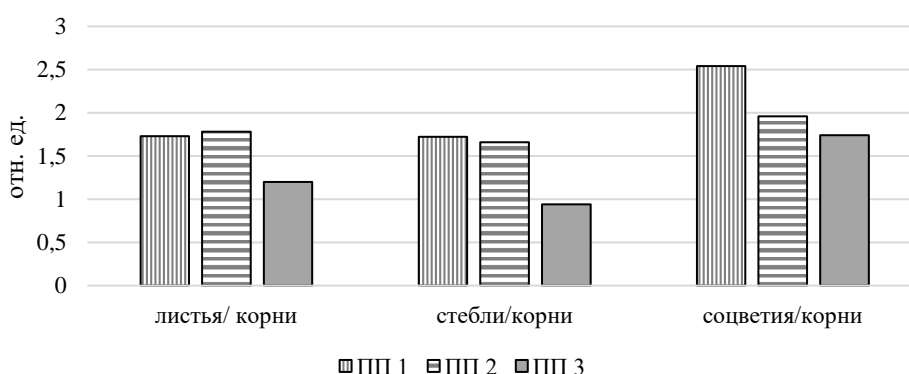


Рис. 4. Коэффициент перехода фосфора из подземных органов *Dactylis glomerata* в надземные /
Fig. 4. Coefficient of phosphorus transfer from the underground organs of *Dactylis glomerata* to the aboveground ones

В большинстве случаев значения этого коэффициента больше 1 (рис. 4), что говорит об интенсивной миграции фосфора и калия в надзем-

ные органы из подземных. Мы также можем заметить, что значения коэффициента перехода имеют максимальные значения при переходе в

соцветия, где он накапливается в семенах в форме фитина.

Заключение

По содержанию в почве подвижного фосфора районы исследования располагаются в порядке убывания в следующей последовательности: ПП 2 > ПП 1 > ПП 3. Наибольшие значения суммарного содержания фосфора во всех органах зафиксированы у средневозрастных генеративных

растений ежи сборной, растущих на ПП 2, наименьшие – на ПП 1. Во всех районах исследования меньше всего содержится общего фосфора в корнях, больше всего в соцветиях. Содержание этого макроэлемента зависит от района исследования, органа растения, а также от совместного действия факторов. Биологическое поглощение фосфора средневозрастными растениями ежи сборной обратно пропорционально содержанию этих элементов в почве.

1. Воскресенская О. Л., Половникова М. Г. Содержание общего фосфора в вегетативных органах газонных растений в условиях городской среды // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2020. № 2 (30). С. 14–22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-obschego-fosfora-v-vegetativnyh-organah-gazonnyh-rasteniy-v-usloviyah-gorodskoy-sredy> (дата обращения: 06.11.2023).

2. Габдуллин В. Р., Гараева Л. А. Мониторинг плодородия почв Республики Марий Эл и пути его повышения // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 4. С. 22–26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-plodorodiya-pochv-respubliki-mariy-el-i-puti-ego-povysheniya> (дата обращения: 06.11.2023).

3. Евдокимова М. А. Оптимизация питательного режима дерново-подзолистой почвы под посевами ярового ячменя // Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». 2016. Т. 1. № 1. С. 10–17. URL: <http://agro-econom.vestnik.marsu.ru/view/journal/article.html?id=1105> (дата обращения: 06.11.2023).

4. Ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) / Н. М. Григорьева, И. М. Ермакова, Л. А. Жукова, А. Р. Матвеев // Диагнозы и ключи возрастных состояний луговых растений. М.: МГПИ им. В. И. Ленина. 1980. Ч. I. С. 56–59. URL: <https://istina.msu.ru/download/20219288/1fC5Iq:Lb5EyaHZ170wwV6umR2AISmc1QU?ysclid=lon1sy1cfh137450953> (дата обращения: 06.11.2023).

5. Желтопузов В. Н., Великдаль Н. Т. Продуктивность и качество корма бобово-злаковых травостоев // Сельскохозяйственный журнал. 2015. № 8. С. 121–126. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/produktivnost-i-kachestvo-korma-bobovo-zlakovyh-travostoev> (дата обращения: 07.11.2023).

6. Изучение фосфатмобилизующей способности штаммов *Agrobacterium radiobacter* 10 и *Pseudomonas chlororaphis* ПГ7 in vitro / С. В. Железняков, Т. В. Калинина, В. К., Деева Ю. В. Лактионов, Л. М. Якоби // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. С. 158–170. URL: <http://www.agrobiologiya.ru/articles/1-2021zheleznyakov-rus.pdf> (дата обращения: 07.11.2023).

7. К теории биологического выноса элементов питания из почвы посевами мятликовых трав при внесении минерального удобрения / С. М. Пакшина, Н. М. Белоус, С. Ф. Чесалин, Е. В. Смольский // Пермский аграрный вестник. 2020. № 3 (31). С. 52–65. URL: <http://agrovest.psa.ru/wp-content/uploads/2022/05/3-2020-52-65.pdf> (дата обращения: 07.11.2023).

8. Накопление биомассы клевером луговым и злаковыми травами разной скороспелости в первый год пользования в Предуралье / В. М. Макарова, Э. Д. Акманаев, Ю. А. Акманаева, Д. Л. Башкирцев // Известия ОГАУ. 2012. № 1–1. С. 32–34. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nakoplenie-biomassy-kleverom-lugovym-i-zlakovymi-travami-raznoy-skorospelosti-v-pervyy-god-polzovaniya-v-preduralie> (дата обращения: 07.11.2023).

9. Фролова Л. Д., Новиков М. Н. Многолетние травы в земледелии Владимирской области // Владимирский земледелец. 2017. № 2 (80). С. 24–25. URL: <https://uchimsya.com/a/bcvx1Mq8> (дата обращения: 07.11.2023).

10. Холдаров Д. М., Собилов А. О. Коэффициент биологической поглощаемости растений в засоленных почвах и солончаках // Universum: химия и биология. 2021. № 1–1 (79). С. 2325. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsient-biologicheskoy-pogloschaemosti-rasteniy-v-zasolennyh-pochvah-i-solonchakah> (дата обращения: 07.11.2023).

11. Weil R. R., Brady N. C. Soil Phosphorus and Potassium // The Nature and Properties of Soils. Columbus, Pearson. 2017. Pp. 643–695. URL: https://www.researchgate.net/publication/337262066_Soil_Phosphorus_and_Potassium (дата обращения: 03.11.2023).

12. Malhotra H., Vandana, Sharma S., Renu P. Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess // Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance. Springer Singapore. 2018. Pp. 171–190. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_7

13. Weil R.R., Brady N.C. Phosphorus and Potassium // The Nature and Properties of Soils. Columbus, Pearson. 2017. Pp. 643–695. Available from: https://www.researchgate.net/publication/337262066_Soil_Phosphorus_and_Potassium (дата обращения: 02.11.2023).

Статья поступила в редакцию 10.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 05.12.2023 г.; принята к публикации 08.12.2023 г.

Об авторе

Закамская Елена Станиславовна

кандидат биологических наук, доцент, Марийский государственный университет (424000, Российская Федерация, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3204-2892>, zakamskay@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

1. Voskresenskaya O. L., Polovnikova M. G. Soderzhanie obshchego fosfora v vegetativnykh organakh gazonnykh rastenii v usloviyakh gorodskoi sredy [Content of total phosphorus in vegetative organs of lawn plants in the conditions of the urban environment]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Estestvennye nauki.* = University Proceedings. Volga Region. Natural Sciences, 2020, no. 2 (30), pp. 14–22. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-obschego-fosfora-v-vegetativnykh-organakh-gazonnykh-rasteniy-v-usloviyah-gorodskoy-sredy> (accessed 06.11.2023). (In Russ.)
2. Gabdullin V. R., Garayeva L. A. Monitoring plodorodiya pochv Respubliki Marii El i puti ego povysheniya [Monitoring and improving soil fertility in the Mari El Republic]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology in AIC, 2019, vol. 33, no 4, pp. 22–26. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-plodorodiya-pochv-respubliki-mariy-el-i-puti-ego-povysheniya> (accessed 06.11.2023). (In Russ.)
3. Evdokimova M. A. Optimizatsiya pitatel'nogo rezhima dernovo-podzolistoi pochvy pod posevami yarovogo yachmenya [Optimization supply of nutrients to the sod-podzolic soil under crops of spring barley]. *Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Sel'skokhozyaistvennye nauki. Ekonomicheskie nauki"* = Vestnik of the Mari State University. Chapter "Agriculture. Economics", 2016, vol. 2, no. 1, pp. 10–17. Available at: <http://agro-econom.vestnik.marsu.ru/view/journal/article.html?id=1105> (accessed 06.11.2023). (In Russ.)
4. Grigorieva N. M., Ermakova I. M., Zhukova L. A., Matveev A. R. Ezha sbornaya (*Dactylis glomerata* L.) [*Dactylis glomerata* L.]. *Diagnostika i klyuchi vozrastnykh izmeneniy lugovykh rasteniy* = Diagnostics and keys of age-related changes in meadow plants. M., Publ. house of MSPI named after V. I. Lenin, 1980, issue 1, pp. 56–59. Available at: <https://istina.msu.ru/download/20219288/1fC5Iq:Lb5EyaHZ170wV6umR2AISmc1QU/?ysclid=lon1sylcfh137450953> (accessed 06.11.2023). (In Russ.)
5. Zheltopuzov V. N., Velikdan N. T. Produktivnost' i kachestvo korma bobovo-zlakovykh travostoev [Productivity and forage quality of legume-grass herbage]. *Sel'skokhozyaistvennyi zhurnal* = Agricultural Journal, 2015, no. 8, pp. 121–126. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/produktivnost-i-kachestvo-korma-bobovo-zlakovykh-travostoev> (accessed 07.11.2023). (In Russ.)
6. Zheleznyakov S. V., Kalinina T. V., Deeva V. K., Laktionov Yu. V., Jacobi L. M. Izuchenie fosfatmobilizuyushchei sposobnosti shtammov *Agrobacterium radiobacter* 10 i *Pseudomonas chlororaphis* PG7 in vitro [The study of *Agrobacterium radiobacter* 10 and *Pseudomonas fluorescens* PG7 phosphate-mobilizing abilities in vitro]. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya* = Agricultural Biology, 2022, vol. 57, no. 1, pp. 158–170. Available at: <http://www.agrobiology.ru/articles/1-2021zheleznyakov-rus.pdf> (accessed 07.11.2023). (In Russ.)
7. Pakshina S. M., Belous N. M., Chesalin S. F., Smolsky E. V. K teorii biologicheskogo vynosa elementov pitaniya iz pochvy posevami myatlikovykh trav pri vnesenii mineral'nogo udobreniya [To the theory of biological removal nutrients from the soil with poaceae grasses when applying mineral fertilizer]. *Permskii agrarnyi vestnik* = Perm Agrarian Journal, 2020, no. 3 (31), pp. 52–65. Available at: <http://agrovest.psa.ru/wp-content/uploads/2022/05/3-2020-52-65.pdf> (accessed 07.11.2023). (In Russ.)
8. Makarova V. M., Akmanaev E. D., Akmanaeva Yu. A., Bashkirtsev D. L. Nakoplenie biomassy klevrom lugovym i zlakovymi travami raznoi skorospelosti v pervyi god pol'zovaniya v Predural'e [Biomass accumulation by meadow clover and grasses of different terms of early ripening in the first year of production]. *Izvestiya OGAU* = News Orenburg State Agrarian University, 2012, no. 1–1, pp. 32–34. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/nakoplenie-biomassy-klevrom-lugovym-i-zlakovymi-travami-raznoy-skorospelosti-v-pervyy-god-polzovaniya-v-preduralie> (accessed 07.11.2023). (In Russ.)
9. Frolova L. D., Novikov M. N. Mnogoletnie travy v zemledelii Vladimirskei oblasti [Perennial herbs in the agriculture of the Vladimir Region]. *Vladimirskaia zemledelets* = Vladimir Agricolist, 2017, no. 2 (80), pp. 24–25. Available at: <https://uchimsya.com/a/bcvx1Mq8> (accessed 07.11.2023). (In Russ.)
10. Kholdarov D. M., Sobirov A. O. Koeffitsient biologicheskoi pogloshchaemosti rastenii v zasolennykh pochvakh i solonchakakh [Biological absorption coefficient of plants in salted soils and salts]. *Universum: khimiya i biologiya* = Universum: Chemistry and Biology, 2021, no. 1–1 (79), pp. 23–25. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsient-biologicheskoy-pogloschaemosti-rasteniy-v-zasolennykh-pochvah-i-solonchakah> (accessed 07.11.2023). (In Russ.)
11. Balemi T., Negisho K. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, no. 12 (3), pp. 547–561. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/aeab/4c9bb9c53795e9b5fab15ac4dbff78c02454.pdf> (accessed 03.11.2023). (In Eng.)
12. Malhotra H., Vandana, Sharma S., Renu P. Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*, Singapor, Springer, 2018, pp. 171–190. (In Eng.). (In Eng.). DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_7
13. Weil R. R., Brady N. C. Phosphorus and Potassium. *The nature and properties of soils*. Columbus, Pearson, 2017, pp. 643–695. Available at: https://www.researchgate.net/publication/337262066_Soil_Phosphorus_and_Potassium (accessed 02.11.2023). (In Eng.)

The article was submitted 10.11.2023; approved after reviewing 05.12.2023; accepted for publication 08.12.2023.

About the author

Elena S. Zakamskaya

Ph. D. (Biology), Associate Professor, Mari State University (1 Lenin Sq., Yoshkar-Ola 420000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3204-2892>, zakamskay@mail.ru

The author has read and approved the final manuscript.