



Сезонная динамика содержания свинца в дерново-подзолистой почве при внесении минеральных удобрений

© 2021. О. А. Чеглакова ✉, Л. Н. Шихова

ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация

Изучали влияние длительного применения возрастающих доз минеральных удобрений (NPK по 0-30-60-90-120-150 кг д. в./га) на содержание и динамику кислоторастворимых и подвижных соединений свинца в пахотном слое дерново-подзолистой почвы в течение вегетационного периода 2016 г. Выявлено, что длительное применение удобрений достоверно увеличивает содержание подвижных форм элемента в почве при внесении NPK в дозах 30 и 150 кг/га д. в./га по сравнению с контролем (в среднем 0,57; 0,51 и 0,33 мг/кг почвы соответственно). Однако даже длительное внесение больших доз минеральных удобрений не приводит к значительному повышению содержания свинца в пахотных горизонтах почв. Кислоторастворимые соединения свинца находятся в диапазоне от 2,46 (N₀P₀K₀) до 5,33 мг/кг (N₁₅₀P₁₅₀K₁₅₀), содержание подвижных соединений свинца соответственно от 0,08 до 1,31 мг/кг почвы при ПДК 6,0 мг/кг. Содержание кислоторастворимых и подвижных соединений свинца в пахотных горизонтах дерново-подзолистой почвы обладало достоверной динамикой в течение вегетационного периода во всех вариантах опыта. Повышение содержания и кислоторастворимых, и подвижных соединений отмечается, как правило, в первой половине вегетационного периода (конец мая – начало июня), что обусловлено, вероятно, активной мобилизацией свинца из малоподвижных соединений в результате активизации микробиологической деятельности при благоприятном гидротермическом режиме. В этот же период происходит увеличение доли подвижных фракций свинца от кислоторастворимых. Внесение возрастающих доз удобрений (30, 60, 90, 120 и 150 кг/га действующего вещества) не всегда показывает достоверное увеличение содержания элемента в соответствующем варианте, что очевидно связано с влиянием неучтенных факторов. Более четкая динамика содержания характерна для подвижных соединений свинца.

Ключевые слова: пахотная почва, длительный стационарный опыт, кислоторастворимые формы свинца, подвижные соединения свинца, вегетационный период, дозы удобрений, длительное внесение минеральных удобрений

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема № 0528-2019-0093).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Чеглакова О. А., Шихова Л. Н. Сезонная динамика содержания свинца в дерново-подзолистой почве при внесении минеральных удобрений. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(2):234-243. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.2.234-243>

Поступила: 15.09.2020

Принята к публикации: 17.03.2021

Опубликована онлайн: 19.04.2021

Seasonal dynamics of lead content in sod-podzolic soil in dependence of mineral fertilizer application

© 2021. Oksana A. Cheglakova ✉, Lyudmila N. Shikhova

Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation

Influence of prolonged use of increasing doses of mineral fertilizers (NPK by 0-30-60-90-120-150 kg of active matter/ha) on contents and dynamics of acid-soluble and mobile compounds of lead in an arable layer of the sod-podzolic soil was studied during the growing season of 2016. It has been established that prolonged application of fertilizers significantly increases the content of mobile forms of the element in the soil at application of NPK in doses of 30 and 150 kg of active matter / ha as compared to the control (average values are 0.57, 0.51, and 0.33, respectively). However, even prolonged application of large doses of mineral fertilizers does not lead to a significant increase in lead content in the arable horizons of the soil. Acid-soluble lead compounds range from 2.46 (N₀P₀K₀) to 5.33 mg/kg (N₁₅₀P₁₅₀K₁₅₀); the content of mobile lead compounds from 0.08 to 1.31 mg/kg of soil, respectively, at maximum acceptable concentration of 6.0 mg/kg. The content of acid-soluble and mobile lead compounds in arable horizons of sod-podzolic soil had a reliable dynamics during the growing season on all variants of the experiment. An increase in the content and acid-soluble and mobile compounds is usually observed in the first half of the growing season (end of May - beginning of June), which is probably due to the active mobilization of lead from slow-moving compounds as a result of the activation of microbiological activity under a favorable hydrothermal regime. In the same period, the portion of mobile fractions of lead to acid-soluble fractions increases. Application of increasing doses of fertilizers (30, 60, 90, 120 and 150 kg/ha of active matter) does not always show a reliable increase in the content of the element in the corresponding variant, which is obviously due to the influence of unaccounted factors. A clearer content dynamics is characteristic of mobile lead compounds.

Keywords: arable soil, long stationary experiment, acid-soluble forms of lead, mobile compounds of lead, growing season, various doses of fertilizers, long-term application of mineral fertilizers

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No.0528-2019-0093).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citations: Cheglakova O. A., Shikhova L. N. Seasonal dynamics of lead content in sod-podzolic soil in dependence of mineral fertilizer application *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(2): 234-243. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.2.234-243>

Received: 15.09.2020

Accepted for publication: 17.03.2021

Published online: 19.04.2021

Техногенез приводит к загрязнению окружающей среды разнообразными поллютантами. Среди них особое место занимают тяжёлые металлы (ТМ) – это элементы с атомной массой более 50 а.е.м.¹, обладающие высокой биохимической активностью. Превышение содержания ТМ в почве выше пороговых значений приводит к нарушению метаболизма и гибели организмов.

Свинец относится к тяжёлым металлам 1-го класса опасности и представляет большую угрозу для окружающей среды и человека^{2, 3}[1, 2]. В растения свинец поступает непосредственно из почвы. Загрязнение растениеводческой продукции особенно опасно, поскольку в ее составе элемент поступает в пищевые продукты (ПДК свинца в зерновых 0,3-0,5 мг/кг)⁴. В почве свинец присутствует в основном в минеральной части, где он входит в состав первичных минералов [3].

На доступность и растворимость содержащихся в почве ТМ оказывают влияние свойства почв, вносимые минеральные удобрения и биологические особенности возделываемых культур. За счет буферных свойств почвы часть ТМ инактивируется, но все же большая часть остается мобильной и активно потребляется растениями.

Некоторое количество свинца поступает в почву с удобрениями и мелиорантами. Минеральные удобрения являются одним из возможных источников загрязнения пахотных почв тяжёлыми металлами за счет балласта, который образуется при производстве удобрений. В ком-

плексных удобрениях возможно содержание до 25 видов загрязняющих веществ, среди которых и ТМ [4, 5]. Например, в составе фосфорных удобрений содержится до 220 мг/кг Pb [6].

Однако единого мнения об уровне накопления тяжёлых металлов в почве от внесения минеральных удобрений не существует. Г. А. Сатаров, проанализировав фосфорно-калийные удобрения, показал, что в их составе среди 6 наиболее опасных элементов наибольшая часть приходится на долю свинца. Так, его валовое содержание в двойном гранулированном суперфосфате составляет 60,3 мг/кг, а в хлористом калии – 8,79 мг/кг. На втором месте находится никель, за ним следуют мышьяк, хром, кадмий и ртуть. Такая же последовательная зависимость сохраняется и по содержанию растворимых форм в 1Н HCl и ацетатно-аммонийном буферном растворе с рН 4,8 [7]. При использовании минеральных удобрений отмечается значительное поступление легкоусвояемых подвижных форм свинца и никеля. Поступившие в почву ТМ накапливаются в ее толще, особенно в верхнем гумусовом горизонте, и период полувыведения, например, для Pb составляет 770-5900 лет [8].

В исследованиях одних авторов применение минеральных удобрений приводило к аккумуляции тяжёлых металлов в почве [9, 10]. В работе А. И. Сердюка с соавторами сделан вывод о том, что долгосрочное внесение минеральных удобрений в комплексе способствовало возрастанию валового содержания тяжёлых металлов в почве полевого севооборота⁵.

¹СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы.

URL: <https://docs.cntd.ru/document/901859456>

²ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. М.: Стандартинформ, 2008. 4 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012797>

³Критерии отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды: утв. приказом МПР России № 511 от 15 июня 2001. [Электронный ресурс].

URL: <https://yandex.ru/turbo/docplan.ru/s/Data2/1/4293836/4293836294.htm> (дата обращения 15.07.2020).

⁴СанПиН 42-123-4089-86. Предельно допустимые концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах № 4089-86 от 31.03.86. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200114682>

⁵Сердюк А. И., Ефимова Ю. Е., Дмитриева Е. Ш. Тяжёлые металлы в почвах севооборота при длительном внесении минеральных удобрений. Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: мат-лы Международ. научн.-практ. конф. молодых ученых. Молодежный: изд-во Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского, 2020. С. 35-43. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44002396>

В исследованиях других авторов существенного накопления тяжелых металлов в почве не происходило [11]. Расчеты Г. А. Сатарова показали, что тяжелые металлы, вносимые в почву с удобрениями, не представляют опасности как загрязнители, так как с урожаем их выносятся больше, чем поступает по двум основным статьям [7].

Большинство исследователей едины во мнении, что многолетнее внесение удобрений способствует накоплению и увеличению подвижности тяжелых металлов, в том числе свинца, в пахотных почвах. Однако в каждом конкретном случае большое влияние оказывают свойства почвы, степень окультуренности, источники сырья для производства удобрений, особенности климата и другие факторы.

По санитарно-гигиеническому нормированию в России содержание элементов-загрязнителей почв оценивают по предельно допустимым концентрациям (ПДК) и ориентировочно допустимым концентрациям (ОДК)⁶.

При оценке техногенных аномалий природных объектов используют фоновые концентрации или «кларк» соответствующих элементов. Фоновые территории – это территории, удаленные от источников загрязнения более чем на 30-50 км [12]. Фоновое содержание свинца в дерново-подзолистых почвах Кировской области составляет 1,86 мг/кг [13]. По А. П. Виноградову кларк свинца в земной коре и почвах составляет 10 мг/кг [14].

В почве доступна для растений лишь очень небольшая доля свинца в составе подвижных соединений. От валового содержания элемента подвижные фракции свинца составляют около 10 % [15]. Большее количество элемента содержится в кислоторастворимых фракциях, которые считаются потенциальным запасом доступных соединений элемента и способны переходить в раствор при подкислении почвы⁷ [16]. Кислоторастворимые формы составляют обычно 40-50 % от валового содержания свинца [7].

Подвижность и доступность элемента для растений существенно меняется в течение вегетационного периода и зависит от многих почвенных факторов, в том числе кислотности почвы, содержания и состава органического

вещества, окислительно-восстановительного режима и других [5, 17]. Однако исследований по выявлению закономерностей изменения содержания ТМ в почвах в течение сезона недостаточно, и они носят отрывочный характер [18]. В данной работе сделана попытка оценки содержания свинца и его динамики в течение вегетационного периода в пахотной дерново-подзолистой почве после длительного применения разных доз минеральных удобрений.

Подобные исследования необходимы для экологического мониторинга геохимической ситуации на сельскохозяйственных землях с целью предотвращения возможного загрязнения почв и растениеводческой продукции.

Цель исследования – изучение влияния длительного применения разных доз минеральных удобрений на содержание и динамику кислоторастворимых и подвижных соединений свинца в пахотном слое дерново-подзолистой почвы в течение вегетационного периода.

Материал и методы. Объектом исследования является дерново-подзолистая пахотная почва длительного стационарного опыта по изучению влияния внесения различных доз минеральных удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур. Длительный стационарный опыт географической сети опытов с удобрениями и другими агрохимическими средствами в международном проекте «Euro-SOMNET» заложен в 1972 г. на опытном поле ФАНЦ Северо-Востока (г. Киров).

В опыте ежегодно применяются следующие минеральные удобрения: аммиачная селитра (NH_4NO_3), суперфосфат двойной гранулированный ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$) и хлористый калий (KCl). Для изучения содержания и динамики кислоторастворимых и подвижных форм свинца выбраны варианты с внесением доз NPK: 30, 60, 90, 120 и 150 кг/га действующего вещества.

Почва опытного участка пахотная дерново-подзолистая, среднесуглинистая, сформирована на элюво-делювии пермских глин и суглинков.

Агрохимические свойства пахотного горизонта в год исследования представлены в таблице 1.

⁶СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы.

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/11/11782>

⁷ГОСТ Р 53218-2008. Удобрения органические. Атомно-абсорбционный метод определения содержания тяжелых металлов (издание с поправкой). М.: Стандартинформ, 2020. 16 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200073052>; Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: Минсельхоз России, 1992. 61 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200048597>

Таблица 1 – Агрохимические свойства пахотного горизонта, 2016 г. /
Table 1 – Agrochemical properties of the arable horizon, 2016

Вариант / Variant	Показатель / Parameter							
	C, %	P ₂ O ₅	K ₂ O	pH _{KCl}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺
		мг/кг почвы / mg/kg of soil	мг-экв/100 г почвы / mg-eq/100 g of soil					
Контроль (без удобрения) / Control (without fertilizer)	1,21	5,7	16,9	4,88	11,49	4,78	1,28	0,28
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	1,32	20,0	26,7	4,49	9,62	3,54	4,04	0,87

Внесение минеральных удобрений с момента закладки опыта привело к повышению содержания органического вещества, питательных элементов (подвижного фосфора и обменного калия), что свидетельствует о положительном эффекте применения удобрений. Однако произошло и повышение кислотности почвы. Отбор почвенных проб проводился из пахотного слоя 0-20 см в шестикратной повторности в выбранных вариантах внесения удобрений в течение вегетационного периода 2016 г. 5 раз: 30 апреля, 1 июня, 24 июня, 20 июля и 18 августа.

Почвенные пробы готовили в соответствии с общепринятыми методами⁸. В пробах определяли: подвижные соединения свинца в ацетатно-аммонийном буферном растворе с pH 4,8 (актуальный запас) и кислоторастворимые соединения свинца в 1N азотной кислоте (потенциальный запас) на атомно-абсорбционном спектрофотометре ацетилен-воздух AA-6800 (SHIMADZU)^{9, 10}.

Статистическую обработку полученных результатов проводили методами дисперсионного и корреляционного анализов с использованием пакета программ Microsoft Excel 2003 и Agros 2.07. Достоверность сезонной динамики содержания подвижных и кислоторастворимых форм свинца оценивали с использованием критерия Дункана.

На характер динамики почвенных факторов сильное влияние оказывают климатические факторы. Метеоусловия в период проведения исследования представлены на рисунках 1, 2. В мае преобладала теплая и засушливая погода. Среднемесячная температура воздуха составила 14 °С. За месяц выпало 30 мм осад-

ков (54 % нормы). Продолжительность периода с минимальной относительной влажностью воздуха (30 % и ниже) достигала 22 дней.

В июне наблюдалась неустойчивая по температуре погода с периодически выпадающими дождями разной интенсивности. Среднемесячная температура воздуха составила 16,5 °С, что близко к климатической норме. Осадки выпали в первой декаде месяца, вторая и третья декада были сухими. Всего за месяц выпало 25 мм (36 % нормы). В июле преобладала теплая, временами жаркая погода с периодически выпадающими сильными дождями. Среднемесячная температура воздуха составила 20,8 °С. За месяц выпало 116 мм осадков (138 % нормы). В августе преобладала жаркая погода с редкими дождями в третьей декаде. Среднемесячная температура воздуха составила 20,9 °С. За месяц выпало 48 мм осадков (68 % нормы).

Результаты и их обсуждение. Пахотный горизонт почв изучаемых вариантов опыта содержит незначительное количество и подвижных, и кислоторастворимых соединений свинца. Кислоторастворимые формы свинца, выделяемые 1n азотной кислотой, определяют потенциальный запас элемента, т. е. то количество, которое может быть доступно для растений при возможном подкислении реакции почвенной среды.

В пахотном горизонте изучаемой почвы содержание кислоторастворимых соединений свинца варьировало в разные сроки в разных вариантах от 2,46 мг/кг (в варианте без удобрений) до 5,33 мг/кг (в варианте с внесением N₁₅₀P₁₅₀K₁₅₀) (табл. 2).

⁸ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа № 4731 от 01.01.86. М.: Стандартинформ, 2008. 8 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/gost-17-4-4-02-84>

⁹Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200078918>

¹⁰Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 488 с.

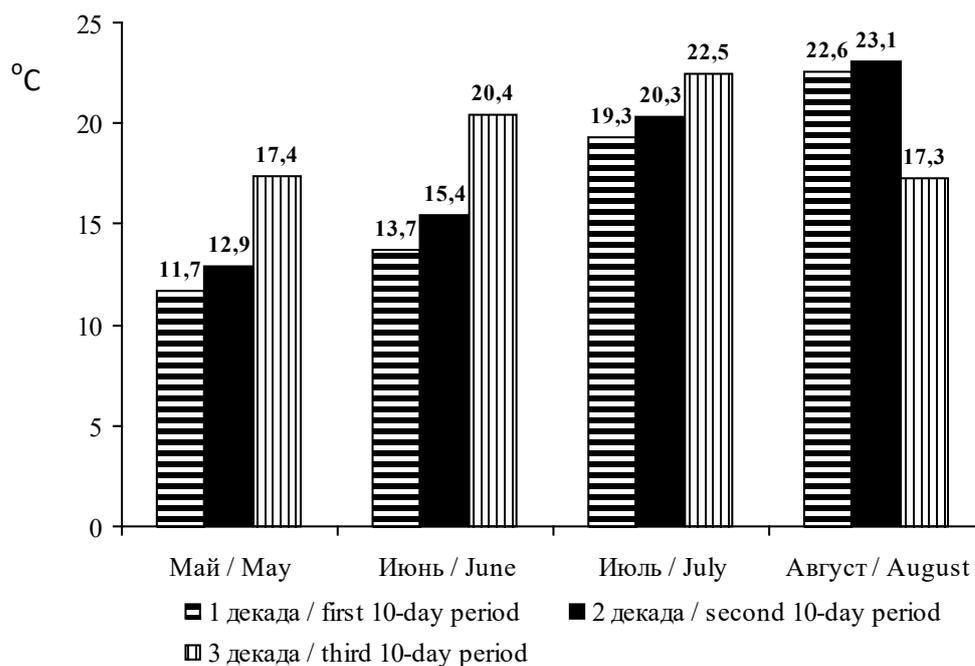


Рис. 1. Температура воздуха в вегетационный период 2016 года по декадам, °С (данные Гидрометобсерватории, г. Киров) /

Fig. 1. Air temperature in the 2016 growing season by 10-day periods, °C (data from the Hydro-meteorological observatory, Kirov)

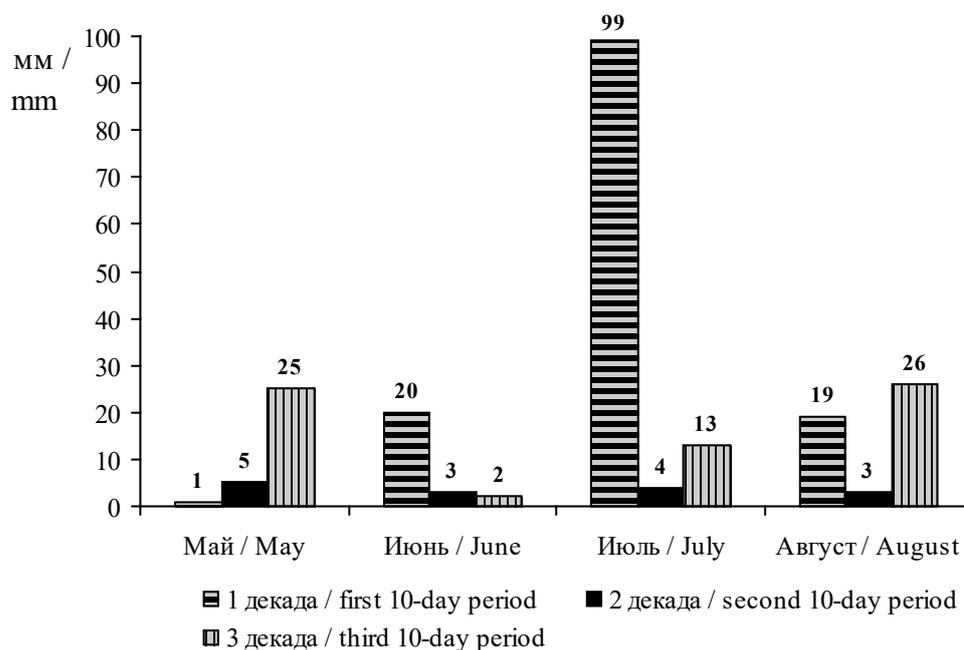


Рис. 2. Сумма осадков в вегетационный период 2016 года по декадам, мм (данные Гидрометобсерватории, г. Киров) /

Fig. 2. Amount of precipitation during the 2016 growing season by 10-day periods, mm (data from the Hydro-meteorological observatory, Kirov)

В течение вегетационного периода в пахотном горизонте выявлено достоверное изменение содержания элемента только по срокам наблюдения. Изменение содержания

элемента по вариантам с внесением разных доз минеральных удобрений в каждый срок отбора почвенных проб недостоверно.

Таблица 2 – Содержание кислоторастворимых соединений свинца в пахотном слое дерново-подзолистой почвы, мг/кг почвы /

Table 2 – Content of acid-soluble compounds of lead in an arable layer of the sod-podsolic soil, mg/kg of soil

Доза минеральных удобрений, кг/га д. в. / Mineral fertilizer dose, kg/ha of active matter	Срок пробоотбора / Sampling period					Среднее по дозе NPK / Average on NPK doze
	30 апреля / April 30	1 июня / June 1	24 июня / June 24	20 июля / July 20	18 августа / August 18	
N ₀ P ₀ K ₀ – контроль / N ₀ P ₀ K ₀ – control	3,50±0,20	2,99±0,36	3,83±0,41	2,46±0,55	3,40±0,35	3,23
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	4,41±0,39	4,15±0,38	3,44±0,59	3,41±0,31	3,86±0,36	3,85
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	4,06±0,70	4,25±0,33	3,74±0,41	4,15±0,38	3,23±0,56	3,88
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	3,49±0,26	4,00±0,25	3,23±0,37	3,03±0,36	3,60±0,32	3,47
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	3,88±0,36	3,84±0,44	4,04±0,39	3,29±0,49	4,18±0,15	3,84
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	3,69±0,50	5,33±1,13	2,83±0,49	3,48±0,63	3,60±0,42	3,78
Среднее по дате отбора* / Average on the period*	3,84bc	4,09c	3,52ab	3,30a	3,64abc	-

* Величины, сопровождаемые одинаковыми буквами, не отличаются по критерию Дункана ($p \leq 0,05$) /

* The values followed by the same letters do not differ according to the Duncan criterion ($p \leq 0.05$)

Максимальное содержание элемента в почве разных вариантов опыта строго не совпадало по срокам, но приходилось на начало или первую половину вегетационного сезона. Во второй половине вегетационного сезона содержание элемента снижалось. Очевидно, это связано с активизацией микробиологической деятельности в начале сезона, ведущей к активной трансформации органического вещества почвы, разрушению минеральной части и повышению доступности свинца почвенных минералов.

Пахотный горизонт почвы контрольного варианта во все сроки наблюдения содержал минимальное количество кислоторастворимых соединений свинца по сравнению с другими вариантами. Характер динамики аналогичен вариантам с внесением удобрений. Во всех вариантах исследования содержание кислоторастворимых соединений свинца варьировало в течение сезона, но в конце срока наблюдения приблизилось к показателям начала вегетационного периода.

Подвижные соединения свинца, выделяемые ацетат-аммонийным буфером, входят в состав кислоторастворимых и характеризуют количество элемента, непосредственно доступное для поглощения растениями [17].

В среднем в дерново-подзолистых и подзолистых почвах северо-востока Европейской равнины содержится не больше 4 мг/кг подвижных соединений свинца [19]. Содержа-

ние подвижных форм свинца в исследуемых почвах в течение всего вегетационного сезона было не только в пределах предельно допустимых значений – 6 мг/кг почвы¹¹, но и не превышало фоновые значения содержания в дерново-подзолистых почвах Кировской области – 1,86 мг/кг [13].

В течение вегетационного сезона содержание подвижных форм свинца в пахотном горизонте существенно изменялось и варьировало от 0,08 до 1,31 мг/кг почвы. Изменение содержания этих форм элемента достоверно как по срокам отбора проб, так и по вариантам с внесением разных доз удобрений (табл. 3).

Пахотный слой почвы контрольного варианта практически во все сроки наблюдения содержал достоверно меньше подвижных соединений свинца по сравнению с почвами вариантов с разными дозами удобрений.

Характер сезонной динамики содержания подвижных соединений свинца имел сложный характер. В начале наблюдения, в весенний период, подвижных соединений немного во всех вариантах опыта. Наибольшее содержание подвижных соединений свинца в почве отмечено в начале июня. Затем их количество резко уменьшалось до конца срока наблюдения. Причём такой характер динамики отмечался во всех вариантах опыта. Лишь в варианте с дозой удобрений 30 кг/га отмечен ещё один незначительный максимум содержания в летний период.

¹¹ГН 2.1.7.2041 – 06 Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901966754>

Таблица 3 – Содержание подвижных соединений свинца в пахотном слое дерново-подзолистой почвы, мг/кг / Table 3 – Content of mobile lead compounds in the arable layer of sod-podzolic soil, mg/kg

Доза минеральных удобрений, кг/га д. в. / Mineral fertilizer dose, kg/ha of active matter	Сроки пробоотбора / Sampling periods					Среднее по дозе NPK* / Average on NPK doze*
	30 апреля / April 30	1 июня / June 1	24 июня / June 24	20 июля / July 20	18 августа / August 18	
N ₀ P ₀ K ₀ – контроль / N ₀ P ₀ K ₀ – control	0,25±0,02	0,56±0,06	0,33±0,03	0,19±0,0	0,32±0,01	0,33a
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	0,49±0,05	1,07±0,28	0,35±0,02	0,59±0,0	0,39±0,01	0,57c
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	0,23±0,03	1,01±0,23	0,43±0,01	0,17±0,0	0,27±0,01	0,42ab
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	0,29±0,08	0,84±0,25	0,14±0,02	0,28±0,04	0,28±0,06	0,37a
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	0,27±0,07	0,97±0,21	0,36±0,07	0,28±0,05	0,08±0,02	0,39ab
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	0,24±0,01	1,31±0,13	0,50±0,09	0,26±0,01	0,24±0,06	0,51bc
Среднее по дате отбора* / Average on the period*	0,30a	0,96b	0,35a	0,30a	0,27a	-

* Величины, сопровождаемые одинаковыми буквами, не отличаются по критерию Дункана ($p \leq 0,05$) / * The values followed by the same letters do not differ according to the Duncan criterion ($p \leq 0.05$)

Такое синхронное изменение содержания элемента вне зависимости от дозы внесения удобрений связано с едиными климатическими и почвенными процессами.

Из литературных источников известно, что подвижность тяжёлых металлов, в том числе и свинца, зависит от климатических факторов (влажности, температуры), микробиологической активности, кислотности почвенного раствора, содержания и подвижности органического вещества почвы [20]. Очевидно, благоприятное сочетание этих факторов в начале лета привело к резкому повышению подвижности соединений свинца. В мае преобладала теплая и сухая погода, которая сменилась в начале июня более влажными условиями, что способствовало ускорению трансформации органического вещества почвы. Известно, что положительные температуры в начале вегетационного сезона при достаточной влажности способствуют активной минерализации органического вещества почвы, увеличению его лабильности, что приводит к повышению подвижности многих металлов [21]. Причиной этого может быть и увеличение кислотности почвенного раствора, также связанное с трансформацией органического вещества [20]. Однако достоверных корреляционных связей содержания подвижных и кислотнорастворимых соединений свинца с кислотностью почв и содержанием органического вещества в наших исследованиях не выявлено. Это может быть связано с высокой изменчиво-

стью данных показателей, а также влиянием неучтённых факторов.

Подвижные соединения свинца составляют небольшую долю от кислотнорастворимых. Отношение содержания подвижной фракции металла к содержанию кислотнорастворимой (в %) характеризует степень его подвижности. Из данных таблицы 4 видно, что максимальная доля подвижных форм свинца от кислотнорастворимых форм отмечалась в начале июня во всех вариантах опыта.

Это подтверждает факт активной мобилизации соединений свинца при благоприятных гидротермических условиях.

Выводы. В результате исследования выявлено, что в пахотном горизонте дерново-подзолистой почвы содержание кислотнорастворимых и подвижных соединений свинца достигало 5,33 и 1,31 мг/кг соответственно и обладало достоверной динамикой в течение вегетационного периода, при этом содержание подвижных форм было существенно ниже предельно-допустимых концентраций.

Минимальные величины содержания кислотнорастворимых и подвижных соединений элемента отмечены в контрольном варианте во все сроки определения (2,46-3,83 и 0,19-0,56 мг/кг почвы соответственно).

Применение удобрений достоверно увеличивало содержание подвижных форм элемента в почве при внесении NPK в дозах 30 и 150 кг д. в./га по сравнению с контролем (в среднем 0,57, 0,51 и 0,33 мг/кг почвы соответственно).

Таблица 4 – Доля содержания подвижных форм свинца от кислоторастворимых, % /
Table 4 – Portion of mobile forms of lead to acid-soluble fractions, %

Доза минеральных удобрений, кг/га д.в. / Mineral fertilizer dose, kg/ha of active matter	Сроки пробоотбора / Sampling periods				
	30 апреля / April 30	1 июня / June 1	24 июня / June 24	20 июля / July 20	18 августа / August 18
N ₀ P ₀ K ₀ – контроль / N ₀ P ₀ K ₀ – control	7	19	9	8	9,
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	11	26	10	17	10
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	6	24	12	4	8
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	8	21	4	9	8
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	7	25	9	9	2
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	7	25	18	8	7

Внесение возрастающих доз удобрений не всегда приводило к росту содержания элемента в соответствующем варианте. Различия содержания кислоторастворимых и подвижных соединений свинца между вариантами с разными дозами могут быть недостоверны, что очевидно связано с влиянием неучтённых факторов.

Более чёткая динамика содержания характерна для подвижных соединений свинца. Максимум их содержания отмечалось во всех вариантах в первой половине вегетационного периода (начало июня), что связано, очевидно, с активной трансформацией органического вещества при наиболее благоприятных гидротермических условиях.

Список литературы

1. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с. Режим доступа: http://www.pochva.com/?content=3&book_id=0579
2. Синдерева А. В., Майданюк Г. А. Экологическая оценка действия свинца в системе «почва-растение-животное» и разработка научно обоснованных приемов его детоксикации. Вестник КрасГАУ. 2018;(6):244-249. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36634866>
3. Шихова Л. Н., Дабах Е. В. Содержание микроэлементов в почвообразующих породах Кировской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2000;(2):13-16.
4. Esmaili A., Moore F., Keshavarzi B., Jaafarzadeh N., Kermani M. A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, Iran. Catena. 2014;(121):88-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.003>
5. Побилат А. Е., Волошин Е. И. Особенности содержания свинца в почвах и растениях Средней Сибири. Микроэлементы в медицине. 2017;18(4):36-40. DOI: <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2017-18-4-36-40>
6. Водяницкий Ю. Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М.: ГНУ Почвенный институт им. В. В. Докучаева РАСХН, 2008. 86 с. Режим доступа: <http://rmag.soil.msu.ru/articles/886.pdf>
7. Сатаров Г. А. Экологические аспекты применения агрохимикатов. Ульяновский медико-биологический журнал. 2013;(1):138-147. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20695427>
8. Самонова О. А., Асеева Е. Н., Формы соединений тяжелых металлов в почвах Среднего Поволжья. Тяжелые металлы в окружающей среде и охрана природы: сб. тр. М.: изд-во МГУ, 1988. С. 162-166. Режим доступа: <https://istina.fnkcr.ru/publications/article/2077963/>
9. Троц В. Б., Ахматов Д. А., Троц Н. М. Влияние минеральных удобрений на аккумуляцию тяжелых металлов в почве и фитомассе зерновых культур. Зерновое хозяйство России. 2015;(1):45-49. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22994653>
10. Францева Т. П., Стрельников В. В., Сухомлинова А. Г., Мельченко А. И., Чернышева Н. В. Оценка влияния минеральных удобрений на агроэкологические показатели чернозема обыкновенного. Научный журнал КубГАУ. 2019;150(6):138-149. DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-150-012>
11. Назарова Л. К., Дильмухаметова И. К., Егоров В. С., Кирпичников Н. А., Морачевская Е. В., Карпухин М. М. Влияние длительного применения минеральных удобрений и известкования на состояние и баланс свинца в агроценозе на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Московской области. Проблемы агрохимии и экологии. 2018;(2):18-23. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35216095>
12. Скипин Л. Н., Ваймер А. А., Квашина Ю. А., Судакова И. К. Загрязнение кадмием и свинцом почв в зоне автомагистрали. Плодородие. 2007;(3):37-38. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12773301>

13. Shikhova L. N. Heavy metals in soils and parent rocks of natural lands in north-east of European Russia. In the book: Heavy metals and other pollutants in the environment: biological aspects. Toronto, 2017. pp. 3-30. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315366029>
14. Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.
15. Дубенок Н. Н., Мажайский Ю. А., Евтюхин В. Ф., Тобратов С. А. Закономерности распределения тяжелых металлов в почвах лесных экосистем (на примере центральной части Рязанского региона). Доклады Российской сельскохозяйственной академии. 2011;(3):26-30. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16243770>
16. Небольсин А. Н., Небольсина З. П. Известкование почв (результаты 50-летних полевых опытов). СПб.: ГНУ ЛНИИСХ Россельхозакадемии, 2010. 254 с.
17. Черкасов Е. А., Саматов Б. К., Цаповская О. Н. Динамика содержания тяжелых металлов в почвах Ульяновской области. Агрохимический вестник. 2016;(1):12-14. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25940645>
18. Шихова Л. Н. Сезонная динамика содержания тяжелых металлов в пахотных почвах Таёжной зоны Кировской области. Доклады Российской сельскохозяйственной академии. 2008;(5):27-29.
19. Нестерова О. В., Трегубова В. Г., Семаль В. А. Использование нормативных документов для оценки степени загрязнения почв тяжелыми металлами. Почвоведение. 2014;(11):1375-1380. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22403790>
20. Соколова О. Я., Стряпков Х. Л., Антимонов С. В., Соловых С. Ю. Тяжелые металлы в системе элемент-почва-зерновые культуры. Вестник Оренбургского государственного университета. 2006;(4):106-110. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26224233>
21. Соколик Г. А., Овсянникова С. В., Попеня М. В., Войникова Е. В. Влияние влажности почвы на содержание кадмия, свинца и урана в подвижных формах. Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2018;54(3):338-348. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-338-348>

References

1. Kabata-Pendias A., Pendias Kh. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh*. [Trace elements in soils and plants]. Moscow: Mir, 1989. 439 p. URL: http://www.pochva.com/?content=3&book_id=0579
2. Sindereva A. V., Maidanyuk G. A. *Ekologicheskaya otsenka deystviya svintsya v sisteme «pochva-rastenie-zhivotnoe» i razrabotka nauchno obosnovannykh priemov ego detoksikatsii*. [Ecological assessment of effect of lead in soil-plant-animal system and development of evidence-based receptions of its detoxication]. *Vestnik KrasGAU = The Bulletin of KrasGAU*. 2018;(6):244-249. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36634866>
3. Shikhova L. N., Dabakh E. V. *Soderzhanie mikroelementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh Kirovskoy oblasti*. [Content of trace elements in soil-forming rocks of the Kirov region]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2000;(2):13-16. (In Russ.).
4. Esmaceli A., Moore F., Keshavarzi B., Jaafarzadeh N., Kermani M. A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, Iran. *Catena*. 2014;(121):88-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.003>
5. Pobilat A. E., Voloshin E. I. *Osobennosti sodержaniya svintsya v pochvakh i rasteniyakh Sredney Sibiri*. [Peculiarities of lead content in soils and plants of Central Siberia]. *Mikroelementy v meditsine = Trace Elements in Medicine* (Moscow). 2017;18(4):36-40. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2017-18-4-36-40>
6. Vodyanitskiy Yu. N. *Tyazhelye metally i metalloidy v pochvakh*. [Heavy metals and metalloids in soils]. Moscow: GNU Pochvennyy institut im. V. V. Dokuchaeva RASKhN, 2008. 86 p. URL: <http://rmag.soil.msu.ru/articles/886.pdf>
7. Satarov G. A. *Ekologicheskie aspekty primeneniya agrokhimikatov*. [Ecological aspects of application of agrochemicals]. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskij zhurnal = Ulyanovsk Medico-biological Journal*. 2013;(1):138-147. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20695427>
8. Samonova O. A., Aseeva E. N., *Formy soedineniy tyazhelykh metallov v pochvakh Srednego Povolzh'ya*. [Forms of heavy metal compounds in the soils of the Middle Volga region]. *Tyazhelye metally v okruzhayushchey srede i okhrana prirody: sb. tr.* [Heavy metals in the environment and nature protection: sat. tr.]. Moscow: izd-vo MGU, 1988. pp. 162-166. URL: <https://istina.fncrr.ru/publications/article/2077963/>
9. Trots V. B., Akhmatov D. A., Trots N. M. *Vliyaniye mineral'nykh udobreniy na akkumulyatsiyu tyazhelykh metallov v pochve i fitomasse zernovykh kul'tur*. [Influence of fertilizers on accumulation of heavy metal in soil and phyto mass of grain crops]. *Zernovoe khozyaystvo Rossii = Grain Economy of Russia*. 2015;(1):45-49. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22994653>
10. Frantseva T. P., Strel'nikov V. V., Sukhomlinova A. G., Mel'chenko A. I., Chernysheva N. V. *Otsenka vliyaniya mineral'nykh udobreniy na agroekologicheskie pokazateli chernozema obyknovennogo*. [Evaluation of the influence of mineral fertilizers on agri-environmental indicators of ordinary black soil]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2019;150(06):138-149. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-150-012>

11. Nazarova L. K., Dil'mukhametova I. K., Egorov V. S., Kirpichnikov N. A., Morachevskaya E. V., Karpukhin M. M. *Vliyanie dlitel'nogo primeneniya mineral'nykh udobreniy i izvestkovaniya na sostoyanie i balans svintsa v agrotsenoze na dervno-podzolistoy tyazhelosuglinistoy pochve Moskovskoy oblasti*. [Influence of long-term use of mineral fertilizers and liming on the state and balance of lead in agrocenosis on soddy-podzolic heavy loamy soil in the Moscow region]. *Problemy agrokhimii i ekologii* = Problemy agrokhimii i ekologii. 2018;(2):18-23. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35216095>
12. Skipin L. N., Vaymer A. A., Kvashina Yu. A., Sudakova I. K. *Zagryaznenie kadmiem i svintsom pochv v zone avtomagistrali*. [Cadmium and lead pollution of soils in the motorway zone]. *Plodorodie*. 2007;(3):37-38. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12773301>
13. Shikhova L. N. Heavy metals in soils and parent rocks of natural lands in north-east of European Russia. In the book: *Heavy metals and other pollutants in the environment: biological aspects*. Toronto, 2017. pp. 3-30. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315366029>
14. Vinogradov A. P. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh khimicheskikh elementov v pochvakh*. [Geochemistry of rare and scattered chemical elements in soils]. Moscow: *Izd-vo AN SSSR*, 1957. 238 p.
15. Dubenok N. N., Mazhayskiy Yu. A., Evtuyukhin V. F., Tobratov S. A. *Zakonomernosti raspredeleniya tyazhelykh metallov v pochvakh lesnykh ekosistem (na primere tsentral'noy chasti Ryazanskogo regiona)*. [Regularities of the distribution of heavy metals in soils of forest ecosystems (by the example of the central part of Ryazan region)]. *Doklady Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Reports of the Russian Academy of agricultural sciences. 2011;(3):26-30. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16243770>
16. Nebol'sin A. N., Nebol'sina Z. P. *Izvestkovanie pochv (rezul'taty 50-letnikh polevykh opytov)*. [Soil liming (results of 50-year field experiments)]. Saint-Petersburg: *GNU LNIISKh Rossel'khozakademii*, 2010. 254 p.
17. Cherkasov E. A., Samatov B. K., Tsapovskaya O. N. *Dinamika sodержaniya tyazhelykh metallov v pochvakh Ulyanovskoy oblasti*. [Dynamics of heavy metals content in soils of Ulyanovsk region]. *Agrokhimicheskiy vestnik* = Agrochemical Herald. 2016;(1):12-14. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25940645>
18. Shikhova L. N. *Sezonnaya dinamika sodержaniya tyazhelykh metallov v pakhotnykh pochvakh Taezhnoy zony Kirovskoy oblasti*. [Seasonal dynamic of heavy metals (pb, cd, cr) contents in arable soils of Taiga zone of Kirov area]. *Doklady Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Reports of the Russian Academy of agricultural sciences. 2008;(5):27-29. (In Russ.).
19. Nesterova O. V., Tregubova V. G., Semal V. A. *Ispol'zovanie normativnykh dokumentov dlya otsenki stepeni zagryazneniya pochv tyazhelymi metallami*. [Use of regulatory documents for assessing the contamination of soils with heavy metals]. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 2014;(11):1375-1380. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22403790>
20. Sokolova O. Ya., Stryapkov Kh. L., Antimonov S. V., Solovykh S. Yu. *Tyazhelye metally v sisteme element-pochva-zernovye kul'tury*. [Heavy metals in the system element - soil - grains]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* = Vestnik of the Orenburg State University. 2006;(4):106-110. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26224233>
21. Sokolik G. A., Ovsyannikova S. V., Popenya M. V., Voynikova E. V. *Vliyanie vlazhnosti pochvy na sodержanie kadmiya, svintsa i urana v podvizhnykh formakh*. [The influence of soil humidity on the content of cadmium, lead and uranium mobile species]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk* = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series. 2018;54(3):338-348. (In Belarus). DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-338-348>

Сведения об авторах

✉ **Чеглакова Оксана Александровна**, младший научный сотрудник лаборатории селекции овощеводства, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, д. 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3227-6274>, e-mail: ovoshevodstvonii@mail.ru

Шихова Людмила Николаевна, доктор с.-х. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела эдафической устойчивости растений, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, д. 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7371-7588>

Information about the authors

✉ **Oksana A. Cheglakova**, junior researcher, the Laboratory of Vegetable Breeding, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, 166a, Lenin St., Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3227-6274>, e-mail: ovoshevodstvonii@mail.ru

Lyudmila N. Shikhova, DSc in Agriculture, professor, leading researcher, the Department of Plant Edaphic Resistance, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, 166a Lenin St., Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7371-7588>

✉ – Для контактов / Corresponding author