

Within the framework of the work, the contribution of the group of main agroecological factors to the final yield of spring wheat was assessed using the principal component method model and multivariate regression. Wheat yields based on the results of 2022 ranged from 22.1 c/ha to 53.6 c/ha with an average value of 40.8 c/ha. It was established that in the conditions of forest-steppe zone of Tatarstan the most significant factors affecting the yield of spring wheat are a group of variables that determine the conditions of heat and moisture availability, namely: the amount of precipitation during the growing season, the sum of temperatures during the growing season, morphometric parameters of slope steepness and exposure. The method and depth of tillage did not have a significant effect on the final yield, as well as a number of other variables analyzed: forms of fertilizers used, predecessors in crop rotation, etc. Such variable as slope exposure was not significantly related to yield. At correlation by Spearman's method $R=0.30$ units, which is not reliable at $n=33$, but at the same time the exposure had a significant effect on temperature availability $> 10^\circ$ and precipitation ($R=0.78$ units and -0.77 units) - the strongest and most important factors of yield formation. When analyzing the differences of mean differences using Tukey's criterion at the significance level of $p=0.05$, no significant differences were found in sub-samples when grouped by variety and agro-ecological land groups. Keywords: Agro-ecological assessment, agrotechnology's, productivity of agrolandscapes.

УДК 631.416.9:631.95

DOI: 10.25680/S19948603.2024.140.20

ВАРИАТИВНОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ МЕЗО-, МИКРО- И УЛЬТРАМИКРО-ЭЛЕМЕНТОВ В ЛИСТОВОМ САЛАТЕ СОРТА НАДИН АГРО

М.А. Эдомская¹, к.б.н., С.Н. Лукашенко¹, д.б.н., А.А. Шупик¹, Н.О. Братухин¹, Д.А. Желтов²,
В.А. Макарова², П.В. Харкин², С.Г. Шаповалов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Обнинск, Россия

²Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан
г. Алматы, Казахстан

Представлены результаты вариативности накопления мезоэлементов (Fe и Mg), микроэлементов (Zn, Mo и Mn), ультрамикроэлементов (Cr, Ni, Pb) и техногенного Pu внутри одного сорта салата Надин Агро, обусловленного индивидуальными особенностями. Установлено, что несмотря на идентичные условия выращивания, наблюдается высокая вариативность накопления рассматриваемых элементов внутри одного сорта, при этом наибольшая вариативность отмечается у техногенного элемента Pu, наименьшая у Ni.

Ключевые слова: коэффициент накопления, Pu, Fe, Cr, Zn, Ni, Mg, Mn, Pb.

Для цитирования: Эдомская М.А., Лукашенко С.Н., Шупик А.А., Братухин Н.О., Желтов Д.А., Макарова В.А., Харкин П.В., Шаповалов С.Г. Вариативность накопления мезо-, микро- и ультрамикроэлементов в листовом салате сорта Надин Агро // Плодородие. – 2024. – №5. – С. 96-101. DOI: 10.25680/S19948603.2024.140.20.

Нарастающее техногенное воздействие приводит к все большей нагрузке на окружающую среду и, как следствие, к большему накоплению токсикантов, способных мигрировать по трофическим цепям.

Согласно агробиохимической классификации [1], все элементы разделяются на макро-, мезо-, микро- и ультрамикроэлементы, инертные и техногенные элементы исходя из их биологической роли и содержания в растениях.

Мезоэлементы – элементы, содержание которых в сухой массе растений находится в диапазоне 0,01–0,1%.

Микроэлементы – элементы, содержащиеся в сухой массе растений в количестве от 0,0001 до 0,01 %. К этой группе относятся элементы, такие как В, Mn, Co, Cu, Mo, Zn.

Содержание ультрамикроэлементов в сухой массе растений оценивается в менее 0,0001 %. По численности элементов данная группа является самой большой. Примерами таких элементов являются Cr, Pb, Ni, Li, Ka, I, Va, Se, Cd и др.

К Техногенным элементам относятся элементы, преимущественно антропогенного происхождения. К таким элементам относятся Pu, Am, Cf, Cm, No, Nr и др. Некоторые ультраследовые концентрации этих элементов могут содержаться в земной коре, однако их содержание настолько низкое, что определяется как правило весьма приблизительно расчетным методом. Например, Pu-239 естественного происхождения образуется вследствие β -

распада Np-239, который образуется при взаимодействии урана с нейтронами. Исходя из среднего содержания урана в земной коре можно дать оценку содержания плутония в ней, которое составит $2 \cdot 10^{-14}$ г/кг.

Минеральное питание является основой для роста и развития организмов. Однако в больших количествах эти элементы токсичны для всех живых организмов. Поэтому исследования миграции таких элементов по трофическим путям, являются важной экологической задачей. Одной из которых является изучение способности растений поглощать элементы [2, 3].

Степени поступления элементов в растения очень изменчивы и зависят от почвенных и климатических условий, вида растений. Кроме того, вариативность накопления элементов может определяться не только видовыми различиями растений, но и внутрисортными различиями, обусловленными индивидуальными особенностями растений. Поэтому содержание элементов в растениях на незагрязненных почвах колеблется в широких пределах. Однако этот предел не безграничен и определяется гомеостазом.

Механизмы гомеостаза растений изучены слабо. В качестве примера его проявления служит относительная избирательность поступления ионов с водой корнями растений и их дальнейшее распределение по органам и

тканям. Также при у некоторых видов растений экстремальных условиях может наблюдаться увеличение концентрации клеточного сока или снижение транспирации. Механизмы поддержания водного баланса неодинаковы, так у галофитов может фиксироваться накопление солей в организме или ограничение их поступления в организм путем выделения солей через специальные железы.

Особый интерес представляет изучение гомеостатических механизмов, определяющих концентрации токсичных элементов, прежде всего, тяжелых металлов. Актуальность данной проблемы возрастает в связи с тем, что ряд тяжелых металлов одновременно являются жизненно важными. В микроколичествах они необходимы для роста и развития растений, в то время как их высокие концентрации нарушают клеточный метаболизм, физиологические процессы, вызывают токсикоз и даже гибель организма [4-8].

Безусловно, каждый вид и сорт растений имеет свою уникальную способность накапливать те или иные элементы [9-11]. Более того, растения, как и все живые организмы, имеют свои индивидуальные особенности. Оценку вариабельности накопления элементов, обусловленную индивидуальными особенностями растений в открытых литературных источниках, найти нам не удалось. Таким образом, несмотря на достаточно большое количество исследований, посвященных изучению поглощения тех или иных элементов растениями, четкого понимания границ их возможного накопления для одного определённого вида нет.

Цель исследования – оценить вариабельность накопления мезоэлементов (Fe и Mg), микроэлементов (Zn, Mo и Mn), ультрамикроэлементов (Cr, Ni, Pb) и техногенного Pu внутри одного сорта листового салата Надин Агро, обусловленную индивидуальными особенностями растений.

Методика. Объектом исследования выбран сорт салата Надин Агро, который адаптирован к гидропонному выращиванию и широко используется в сельском хозяйстве. Предметом исследования являлась внутрисортовая вариативность накопления Fe, Cr, Zn, Ni, Mg, Mn, Pb, Pu.

Основной путь поступления металлов в растения осуществляется корнями. Следовательно почвенная среда – это основной источник элементов для растений. Известно, что свойства почвы и почвенного раствора определяют динамическое равновесие элементов в системе «твёрдая фаза почвы – почвенный раствор», что в свою очередь определяет величину их доступности для растений. С другой стороны, корневое поглощение элементов растениями может регулироваться механизмами, уменьшающими их концентрацию в ризосфере. Например, выделение слизи корневой системой растений, которые способны связывать элементы в почве, тем самым ограничивая их поглощение растениями или выделение в ризосферу корневой системой ряда соединений, способствующих связыванию ионов и осаждению их на поверхность корня. Для исключения влияния почвенных характеристик при оценке поглощения элементов растениями целесообразно проводить исследования с использованием гидропонного метода выращивания.

Выращивание растений проводили на гидропонной установке (рис. 1), позволяющей выращивать отдельно до 36 растений. Вместимость установки составляет 8 л. В процессе выращивания обеспечивается постоянная

циркуляция питательного раствора, что гарантирует одинаковое корневое питание (одинаковые условия выращивания).



Рис. 1. Вид гидропонной установки

В качестве питательного раствора использовали водный раствор солей из соотношения на 1 л: 430 мг $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 290 мг $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 870 мг KNO_3 . В подготовленный раствор были внесены элементы до концентрации Fe – 200 мкг/л, Cr – 7, Mg – 700, Zn – 100, Ni – 5,5, Pb – 3, Mn – 20, Mo – 1,5 мкг/л, ^{239}Pu – 150 Бк/л. Для предотвращения изменения характеристик питательного раствора в течение всего периода вегетационного опыта проводили полную замену раствора один раз в неделю.

Растения высаживали пророщенными семенами по одному в пластиковые чаши, содержащие поролоновый вкладыш, которые шли в комплекте с гидропонной установкой. Выращивание проводили в уличных условиях под навесом.

Температурный режим и влажность воздуха контролировали с помощью регистратора Elitech GSP-6 с автоматической записью каждый час. Диапазон среднесуточных температур воздуха в вегетационный период составил 18-23 °C. Среднесуточная влажность воздуха варьировала в диапазоне от 43 до 83 %. Вегетационный период составлял 30 дней.

В конце вегетационного периода образцы растений срезали, промывали водопроводной водой и ополаскивали дистиллированной водой. Образцам присваивали лабораторный код «ИОД» с порядковым номером образца. Далее пробы высушивали в сушильном шкафу при температуре 75°C до постоянной массы. Масса сухих образцов, отобранных для анализа, варьировала от 0,1 до 0,6 г (рис. 2).

Сухие образцы растений помещали в керамические тигли, вносили ^{242}Pu в качестве трассера и отжигали в муфельной печи при температуре 500°C в течение 8 часов до видимого разрушения органического вещества (черного цвета). Озоленные образцы растений количественно переносили в тefлоновый стакан и растворяли смесью минеральных концентрированных кислот (HNO_3 и HCl) обрабатывали до полного растворения. Далее переводили раствор в 7,5 М HNO_3 объемом 50 см³. Полученные растворы взвешивали.

Для определения содержания элементов из полученного раствора в пробирку отбирали аликвоту 3 см³, записывая массу каждой аликвоты. Образцы разбавляли деионизированной водой ($\leq 0,2 \mu\text{S}$). Коэффициенты разбавления составляли от 1 до 7 в зависимости от сухой массы растений.

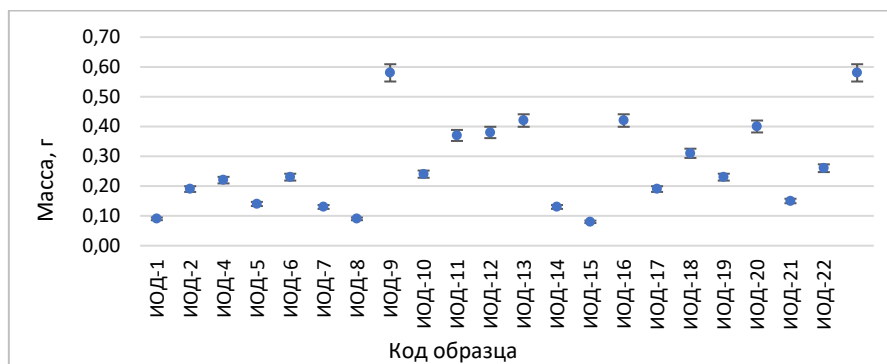


Рис. 2. Масса сухих образцов растений

Элементный анализ разложенных образцов растительности выполняли методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП), на квадрупольном масс-спектрометре ELAN-9000 (PerkinElmer SCIEX) и оптико-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ОЭС-ИСП) на оптико-эмиссионном спектрометре двойного обзора OPTIMA-8000DV (Perkin Elmer Inc.). На обоих спектрометрах использовали штатный поперечно-поточный распылитель с ритоновой распылительной камерой и типичные операционные параметры [12–14].

Для коррекции инструментального дрейфа во все измеряемые пробы и градуировочные растворы вводили внутренние стандарты ^{103}Rh 5 мкг/л (для МС-ИСП) и Sc 0,25 мг/л (для ОЭС-ИСП). Для приготовления градуировочных растворов использовали стандартные образцы (СО) состава металлов производства Perkin Elmer (США): N9300235, N9300233. Приемлемость градуировочной характеристики определяли по критерию $R2 \geq 0,9992$, где $R2$ – величина достоверности аппроксимации линейной функции.

Оставшийся в колбе раствор использовали для анализа содержания плутония. Анализ содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в образцах проводили методом, описанным в [15]. Для стабилизации плутония в состоянии Pu^{4+} вносили 0,2–0,3 г NaNO_2 . Проводили радиохимическое выделение методом ионообменной хроматографии на анионите АВ-17х8. Элюирование плутония проводили 5%-ным раствором гидроксиламина солянокислого. Далее методом соосаждения с фторидом лантана с последующей фильтрацией на мембране с максимальным размером пор 0,1 мкм получали спектрометрические источники.

Измерение удельной активности изотопов плутония проводили альфа-спектрометрическим методом на спектрометре Alpha Duo, ORTEC в течение 24 ч. Расчет активности $^{239+240}\text{Pu}$ выполняли из соотношения регистрируемых импульсов, исходя из известной активности предварительно введенного в пробу трассера ^{242}Pu .

Для количественной оценки степени перехода химических элементов в растения использовали коэффициент накопления (Кн), рассчитываемый как отношение концентрации (или удельной активности) элемента в сухой массе растений к его концентрации (или удельной активности) в среде выращивания – почва ($\text{Кн}_{\text{поч}}$) или раствор ($\text{Кн}_{\text{вод}}$).

Результаты и их обсуждение. Полученные значения коэффициентов накопления рассматриваемых элементов в образцах листового салата представлены на рисунке 3.

Вариабельность коэффициентов накопления рассматриваемых элементов листовым салатом Надин агро,

обусловленная индивидуальными особенностями, оценивали из соотношения максимального значения Кн к минимальному. По величине вариабельности поглощения листовым салатом элементы можно ранжировать в следующий ряд:

$\text{Pu}(15) > \text{Mo}(6,9) > \text{Fe}(5,5) > \text{Mn}(5,4) > \text{Mg}$ и $\text{Pb}(5,0) > \text{Zn}(4,5) > \text{Cr}(3,6) > \text{Ni}(1,9)$.

Для некоторых элементов наблюдаются единичные пики, которые можно было бы интерпретировать, как выбросы. Например, высокий Кн свинца для образца «ИОД 12». Однако, Кн данного образца других элементов близки к средним значениям. Поэтому можно предположить, что такие выбросы являются индивидуальными особенностями конкретного растения по отношению к конкретному элементу.

Для последующей оценки полученных результатов проведен анализ частот встречаемости Кн в различных агробиохимических группах.

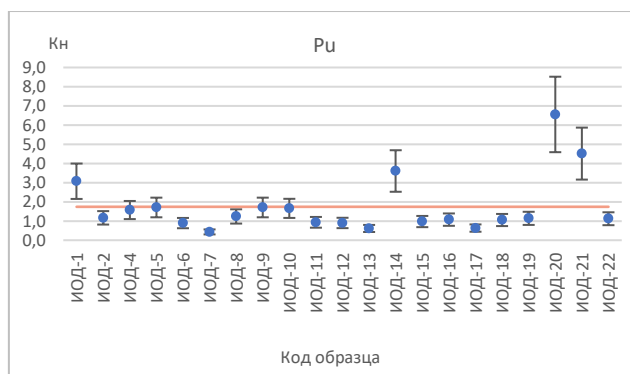
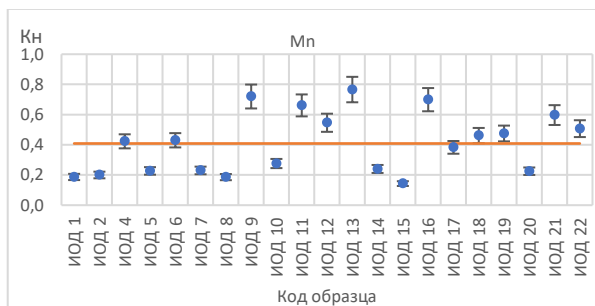
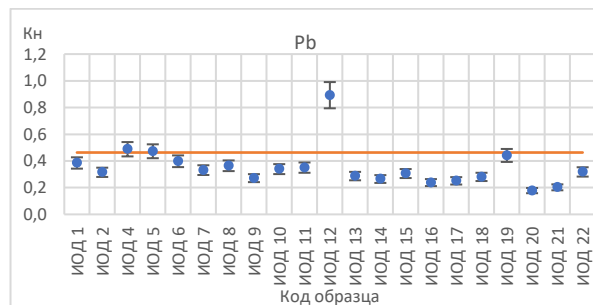
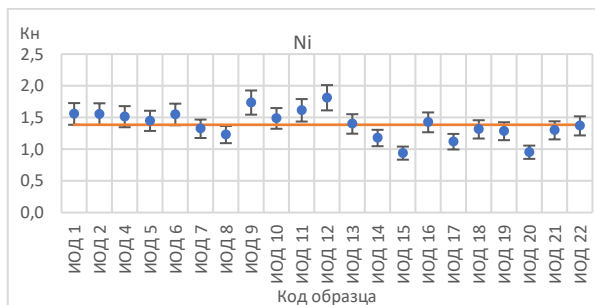
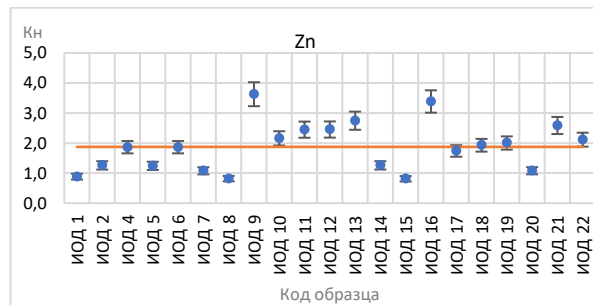
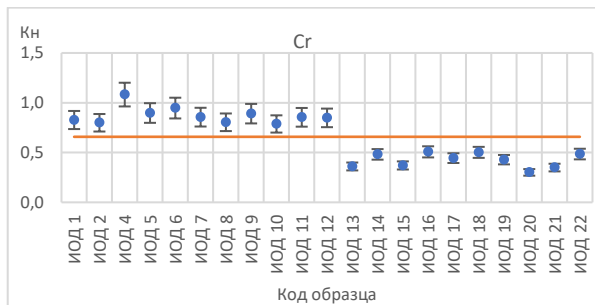
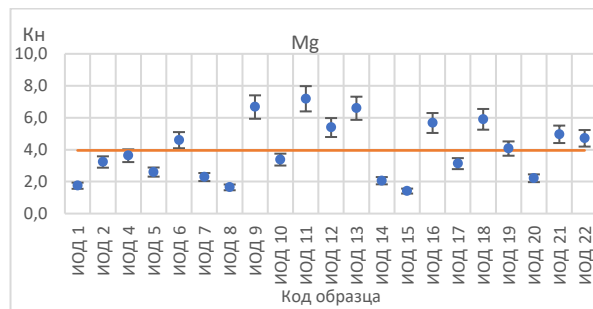
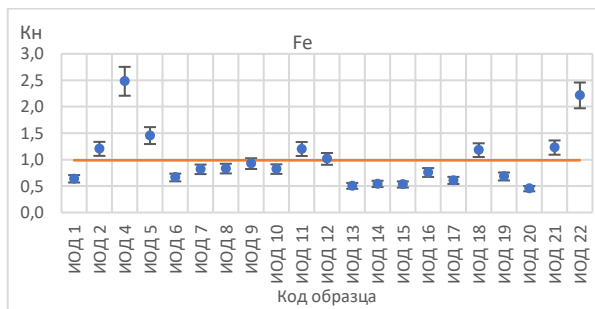
На рисунке 4 представлена гистограмма распределения частот встречаемости Кн по диапазонам значений.

Диапазон значений частоты встречаемости Кн варьирует от <0,5 до 3,0 для железа, от 1,0 до >7,0 для магния, 0,5 до >3,0 для цинка, от <0,2 до 1,0 для молибдена, <0,2 до 1,0 для марганца, от 0,8 до 2,0 для никеля, от <2,0 до 1,0 для свинца, от 0,25 до 1,25 для Cr и от <0,5 до >6,0 для Pu .

Распределение для мезо- и микроэлементов имеет логнормальный вид, преимущественно со смещением влево. Смещение вправо наблюдается для Mn . Пик частоты встречаемости Кн находится в диапазоне 0,5–1,0 для Fe , 2,0–5,0 для Mg , 1,0–2,0 для Zn , <0,2 для Mo , 0,2–0,5 для Mn , 1,2–1,6 для Ni , 0,2–0,4 для Pb и 0,5–1,5 для Pu .

Особое распределение отмечается у Cr , для которого диапазон значений Кн варьирует от 0,25 до 1,25. Распределение имеет бимодальный вид. Наблюдаются два пика частоты встречаемости Кн в диапазонах 0,25–0,5 и 0,75 и 1,0. Это может быть связано с тем, что валентность хрома оказывает значительное влияние на его токсичность и биодоступность. Трехвалентная форма хрома [$\text{Cr}(\text{III})$] является неподвижной и менее токсичной в восстановительных условиях, в то время как шестивалентный хром [$\text{Cr}(\text{VI})$] в условиях окисления представляет собой подвижное токсичное и биодоступное соединение.

Поскольку значения Кн рассматриваемых элементов значительно различаются, для дальнейшего анализа проведено нормирование относительно среднего. На рисунке 5 представлена диаграмма распределения частот встречаемости значений $\text{Кн}/\text{Кн}_{\text{ср}}$ рассматриваемых элементов.



— Среднее значение

Рис. 3. Коэффициенты накопления элементов листовым салатом Надин Агро

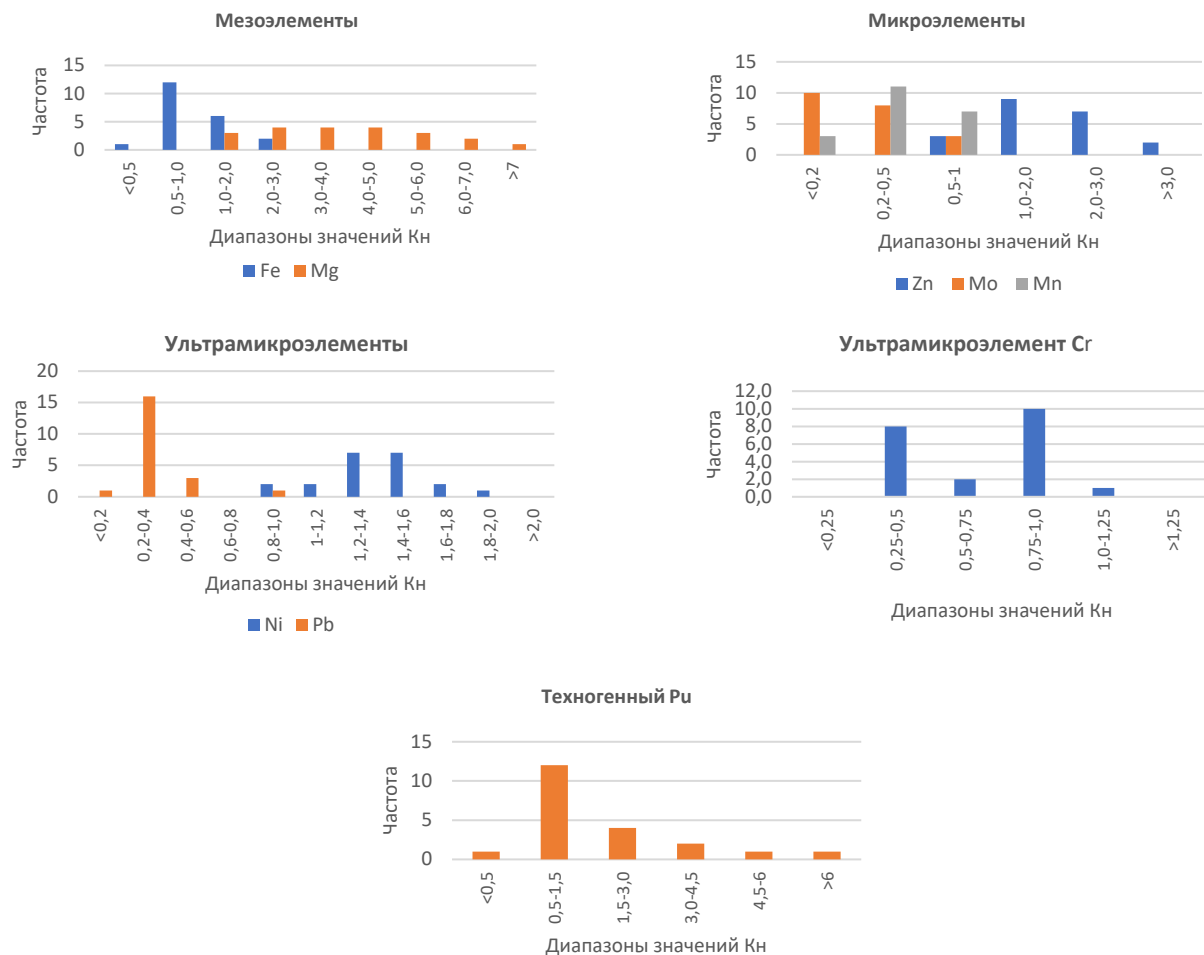


Рис. 4. Распределение частот встречаемости коэффициентов накопления

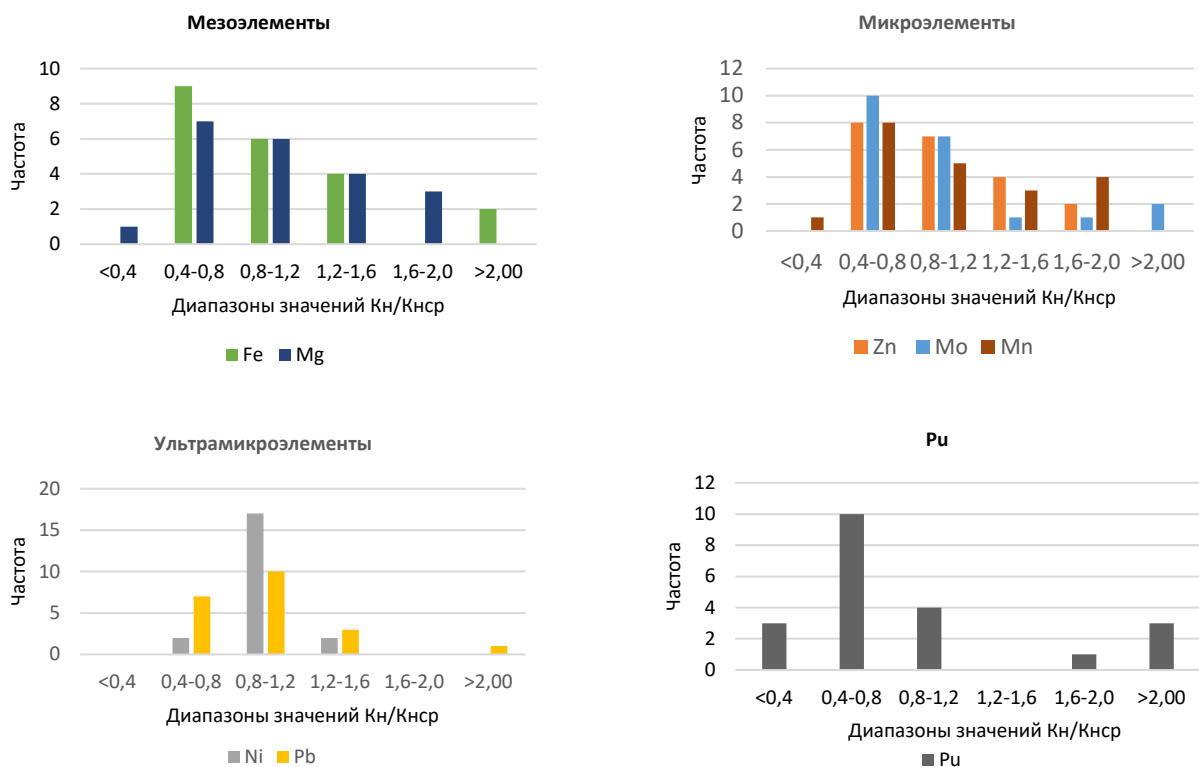


Рис. 5. Распределение частот встречаемости Кн/Кнср элементов

Распределение для большинства элементов имеет логнормальный вид. Пик частоты встречаемости (модальный диапазон) $K_n/K_{n\text{cp}}$ у Fe, Mg, Zn, Mo, Mn, Pu находится в диапазоне значений от 0,4 до 0,8, что свидетельствует о более низких модальных значениях относительно среднеарифметических.

Пик частоты встречаемости $K_n/K_{n\text{cp}}$ ультрамикроэлементов (Ni и Pb) достигается в диапазоне 0,8-1,2. Это свидетельствует о близком значении модальных значений и среднеарифметических.

В отношении техногенного плутония, как и для микро- и мезоэлементов, наблюдается смещение модальных значений в сторону уменьшения относительно средних величин.

Заключение. В ходе настоящего исследования установлена вариабельность поглощения элементов (Fe, Cr, Zn, Ni, Mg, Mn, Pb, Pu) внутри одного сорта листового салата Надин Агро, обусловленная индивидуальными особенностями растений.

Установлено, что несмотря на идентичные условия выращивания наблюдается высокая вариативность накопления рассматриваемых элементов внутри одного сорта сельскохозяйственной культуры листового салата Надин Агро, существенно превышающая аналитическую погрешность. При этом наибольшая вариабельность K_n отмечается у техногенного элемента Pu. Наименьшая вариабельность поглощения у Ni.

Литература

1. Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Лебедевский И.А., Осипов М.А. Агрохимия биогенных элементов: учеб. пособие. – Краснодар: КубГАУ, 2020. – 223 с.
2. Marschner, H. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. – 1995.
3. Becana, M., Aparicio-Tejo, P., Irigoyen, J. J., & Sanchez-Diaz, M. Some enzymes of hydrogen peroxide metabolism in leaves and root nodules of *Medicago sativa* // *Plant Physiology*. – 1986. – Vol. 82(4). – Pp. 1169-1171.

4. Чомаева М.Н. Биологическая роль и токсикологическое влияние тяжелых металлов / Материалы XIX международной научно-практической конференции. Секция Науки о земле, 2017. – С. 13-15.
5. Ragsdale, S.W. Metals and their scaffolds to promote difficult enzymatic reactions // *Chemical reviews*. – 2006. – Vol. 106(8). – Pp. 3317-3337.
6. Maksymiec, W. (1997). Effect of copper on cellular processes in higher plants. Photosynthesis, respiration, and utilization of mineral nutrients // *Photosynthetica*. – 1997. – Vol. 34(3). – Pp. 321-342.
7. Cakmak, I. Tansley Review No. 111. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species // *New Phytologist*. – 2000. – Vol. 146(2) – Pp. 185-205.
8. Erdemir, U. S., & Kacar, B. Nickel: An overview of uptake, essentiality and toxicity in plants // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2003. – Vol. 71(1) – Pp. 1-9.
9. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*. Technical Reports Series No. 472. – Vienna: IAEA, 2010. – 194 p.
10. Erdemir, U. S., & Kacar, B. Nickel: An overview of uptake, essentiality and toxicity in plants // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2003. – Vol. 71(1) – Pp. 1-9.
11. Pourrut, B., Shahid, M., Dumat, C., Winterton, P., & Pinelli, E. Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants // *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2011. – Vol. 213. – Pp. 113-136.
12. СТ РК ИСО 17294–1–2011 Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Ч.1: Общее руководство. URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31610236&pos=2;-108#pos=2;-108. (Дата обращения: 06.12.2022).
13. СТ РК ИСО 17294–2–2006 Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Ч.2. URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30371803. (Дата обращения: 06.12.2022).
14. ПНД.Ф 16.2.2.2.3.71-2011 Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами. URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4293793/4293793107.pdf>. (Дата обращения: 06.12.2022).
15. Edomskaia M.A., Lukashenko S.N., Stupakova G.A., Kharkin P.V., Gluchshenko V.N., Korovin S.V. Estimation of radionuclides global fallout levels in the soils of CIS and eastern Europe territory // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2022. – Vol. 247. – P. 106865.

VARIABILITY OF ACCUMULATION OF MESO-, MICRO- AND ULTRAMICROELEMENTS IN NADINE AGRO LEAF LETTUCE

M.A. Edomskaia¹, Ph.D., S.N. Lukashenko¹, Doctor of Biology, A.A. Shupik¹, N.O. Bratukhin¹,
D.A. Zheltov², V.A. Makarova², P.V. Kharkin², S.G. Shapovalov¹

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»
(NRC «Kurchatov Institute» – RIRAE), Obninsk, Russia

²Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

The article presents the results of variability in the uptake of mesoelements (Fe and Mg), microelements (Zn, Mo and Mn), ultramicroelements (Cr, Ni, Pb) and technogenic Pu within one variety, due to individual characteristics. It has been established that, despite identical growing conditions, there is a high variability in the uptake of the elements under consideration within one variety, with the greatest variability observed in the technogenic element Pu, the least in Ni.

Key words: Transfer factor, Pu, Fe, Cr, Zn, Ni, Mg, Mn, Pb.