

Вміст неорганічних елементів у зерні рису залежно від способів зрошення

В. В. Швартау^{1*}, Л. М. Михальська¹, В. В. Дудченко², В. О. Скидан²

¹Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, вул. Васильківська, 31/17, м. Київ, 03022, Україна, *e-mail: VictorSchwartau@gmail.com

²Інститут рису НААН України, с. Антонівка, Скадовський р-н, Херсонська обл., 75705, Україна

Мета. Дослідити вміст важких металів у зерні різних сортів рису за різних умов поливу. Оцінити вміст основних мікроелементів – компонентів редокс-систем рослин у зерні рису для біофортифікації та інгібування накопичення важких металів. **Методи.** Рослини сортів рису ‘Консул’ і ‘Віконт’ вирощували на дослідних полях Інституту рису НААН України за поливу затопленням чи краплинним зрошенням. Зразки зерна до елементного аналізу спалювали в азотній кислоті на системі мікрохвильової підготовки проб Milestone Start D. Визначення вмісту неорганічних елементів проводили методом мас-спектрометрії з індуктивно зв’язаною плазмою (ICP-MS) на Agilent 7700x у режимі продувки гелієм. **Результати.** Впровадження крапельного поливу в порівнянні з поливом затопленням призвело до зниження накопичення арсену в зерні у 2,3–3,0 рази. При цьому встановлено зростання накопичення кадмію та стронцію. За крапельного поливу збільшилось також накопичення у зерні мікроелементів – складових редокс-систем рослин (міді, цинку, марганцю). Незначне зниження вмісту заліза при цьому може бути пов’язане із активацією механізмів блокування надходження та перерозподілу арсену в зерно. Урожайність сортів рису була вищою при затопленні. У сортів ‘Віконт’ і ‘Консул’ при затопленні вона була на рівні 9,35 та 11,76 т/га, а за краплинного зрошення – 6,80 й 9,30 т/га відповідно. Сумарний вміст неорганічних елементів був істотно нижчим у зерні сорту ‘Консул’. Ймовірно, це пов’язано із відносним зниженням елементів у біомасі за високої продуктивності даного сорту. **Висновки.** Природна контамінація урожаю рису арсеном суттєво обмежує харчову цінність культури. Впровадження крапельного поливу посівів рису дозволяє знизити рівні накопичення високотоксичного арсену в зерні, що особливо важливо для продуктів дієтичного та дитячого харчування. Визначене за крапельного поливу зростання накопичення кадмію та стронцію обумовлює високі вимоги до якості фосфорних добрив, що застосовуються у технологіях вирощування культури. Впровадження крапельного поливу оптимізує аеробні умови надходження іонів, що призводить до зростання накопичення мікроелементів – компонентів редокс-систем рослин. Виключенням є невелике зниження вмісту заліза, що може бути пов’язано із активацією механізмів інгібування надходження арсену до зерна рису. При цьому спостерігається невелике зниження продуктивності посівів. Таким чином, за крапельного поливу спостерігається посилення накопичення біологічно важливих металів та зниження накопичення високотоксичного арсену.

Ключові слова: арсен; важкі метали; мікроелементи; спектрометрія; ICP-MS.

Вступ

Виробництво якісних продуктів харчування є одним із основних завдань рослинництва [1]. Отримання безпечної продукції рисівництва значною мірою залежить від біологічних особливостей сортів і технологій їхнього вирощування, у тому числі й способів зрошення посівів. До 75% води, яка використовується у сільському господарстві, приходиться на зрошення рисових полів [2].

Дефіцит прісної води у світі обмежує продуктивність сільського господарства. Одним із напрямків вирішення проблеми отримання екологічно безпечної продукції рисівництва є

удосконалення технології вирощування рису. Тому проводяться дослідження з вирощування рису за краплинного зрошення, що може заощадити до 50% зрошувальної води, знизити рівні викидів метану в атмосферу й зменшити концентрації арсену в зерні.

На перезволожених ґрунтах зростає небезпека забруднення сільськогосподарської продукції ксенобіотиками завдяки збільшенню їхньої мобільності. Арсен відрізняється високою мобільністю у ґрунті в анаеробних умовах і може накопичуватися в урожаї в значних кількостях.

Арсен (As) один з найтоксичніших для людини неорганічних елементів й характеризується високими рінками карциногенності [3]. Арсенати в агрофітоценозах мають, переважно, не антропогенне походження. За потрапляння у біоценози арсенати взаємодіють з водою, зокрема з ґрунтовими водами, і потрапляють у харчові ланцюги [4]. Забруднені арсеном ґрунти, донні відкладення та мул є основними його джерелами в харчових ланцюгах, поверхневих і підземних водах та

Victor Schwartau
<http://orcid.org/0000-0001-7402-5559>
Liudmyla Mykhalska
<http://orcid.org/0000-0002-0677-5574>
Volodymyr Dudchenko
<http://orcid.org/0000-0001-8545-7904>
Vadym Skydan
<http://orcid.org/0000-0001-5592-2107>

питній воді [5, 6]. Концентрація арсену в незабруднених ґрунтах зазвичай нижче 10 мг/кг, тоді як у забруднених вона може досягати 30 000 мг/кг [7].

Понад 3 млрд людей у світі страждають від забруднення рису арсеном [8]. Нещодавно опубліковані дослідження вмісту арсену в різних харчових продуктах (включаючи питну воду), індексовані в мережі ISI Web of Science за період з 2010 по 2015 рік, показують, що майже 52% наукових публікацій щодо надходження токсичного арсену через раціон харчування відносяться до досліджень рису [9]. Арсен накопичується у різних частинах рослин рису, а рівні його накопичення залежать від сорту та технологій вирощування. Відносно високі рівні вмісту арсену в рисі зумовлені низкою факторів, включаючи мобілізацію і біодоступність арсену в ґрунті після затоплення рисових полів фермерами та поглинання рослинами арсену протягом формування архітектури посіву. Арсен у генеративний період розвитку рису, зокрема у фазу наливу зерна може перерозподілятися кремній-транспортними системами чи переносниками в зерно.

При вирощуванні рису середній рівень As в рисі становить < 0,01–2,05 – для Бангладеш, 0,31–0,70 – для Китаю, 0,03–0,044 – для Індії, < 0,10–0,76 – для Тайваню, 0,11–0,66 мг/кг – США, 0,03–0,47 – для В'єтнаму та 0,08–0,38 мг/кг – для Італії та Іспанії [8–10]. За даними ВООЗ основними джерелами потрапляння арсену в людський організм є вода та їжа [2, 4].

Нещодавно ЖЕСФА запропонував максимальний рівень неорганічного арсену в шліфованому рисі – 0,2 мг/кг. Європейська агенція з безпеки харчових продуктів (EFSA) переглянула раціон харчування населення Європейського Союзу та рекомендувала зменшити допустимий вміст неорганічного арсену для дієтичних продуктів [10, 11]. Тому проблема контролювання вмісту арсену в рисі й розробка шляхів його зниження є актуальною.

Коректне визначення вмісту арсену в складних матрицях, таких як харчові продукти, є ускладненим, оскільки матриця повинна руйнуватися при підвищеній температурі без втрати леткого аналіту (As) або стороннього забруднення. Визначення сполук As, як правило, проводиться за допомогою генерації гідридів (HG), рідинної хроматографії (LC), газової хроматографії (GC) та капілярного електрофорезу (CE). Проте, точнішим є визначення вмісту арсену в рослинах методом ICP-MS після мікрохвильової пробопідготовки [12, 13]. Мікрохвильова підготовка проб до аналі-

зу дозволяє зберегти леткий аналіт (As) протягом дигестії в азотній кислоті, а високий рівень стабільності до матричних ефектів сучасного мас-спектрометра дозволяє коректно визначати неорганічні елементи від літію до урану одночасно в широкому динамічному діапазоні за ефективного блокування поліатомних інтерференцій [12, 13]. Поряд з високотоксичним арсеном у зерні рису можуть накопичуватися й інші елементи, що обумовлено біологічними особливостями культури та технологій вирощування. Наприклад, за внесення фосфорних добрив можливе збільшення у рослинах вмісту стронцію, свинцю. В окремих ґрунтових відмінах можливе підвищене накопичення урану-238 [1, 12]. При цьому, за детектування згаданих токсикантів важливо визначати й вміст неорганічних елементів, які за їхнім значенням для живлення рослин можуть розглядатися в ролі факторів зниження рівнів накопичення токсичних ксенобіотиків у зерні зернових культур.

Мета досліджень – установити методом ICP-MS вміст арсену та інших металів у зерні двох сортів рису за різних умов поливу.

Матеріали та методика досліджень

Умови вирощування рослин. Дослідження проводили на дослідному полі Інституту рису НААН України. Ґрунт дослідного поля – лужно-каштановий залишково-солонцюватий. Посів сортів рису проводили в II декаді травня у 2016 та 2017 роках. У досліді висівали середньостиглі сорти рису 'Віконт' і 'Консул' Інституту рису НААН України. Посів проводили сівалкою Клен-1,5П вздовж ділянок. Норма висіву насіння – 7 млн/га. Повторність в досліді – 4-разова. Загальна площа ділянки – 30, залікова – 25 м². Водний режим у досліді встановлено за типом «укороченого затоплення» та краплинного зрошення. Збір урожаю проводили за повної стиглості зерна комбайном «Янмар». Досліді було закладено з дотриманням вимог методики дослідної справи для посівів рису на поливі [6].

Визначення вмісту окремих неорганічних елементів у зерні рису методом ICP-MS. Зразки зерна було відібрано з кожної ділянки варіанту у фазу повної стиглості. Для аналізу зразки зерна перемелювали на лабораторному млині й проводили озолення в азотній кислоті за допомогою системи мікрохвильової пробопідготовки Milestone Start D (Milestone S.r.l., Italy). Визначення вмісту неорганічних елементів у зразках проводили на мас-спектрометрі (ICP-MS) Agilent 7700x (USA) [12, 13].

Усі розчини готували на воді 1-го класу (18 МОм), підготовленій за допомогою сис-

теми очищення води Scholar-UV NexUp 1000 (Human Corporation, Korea).

Використовували калібрувальні розчини Standard solution IV-ICPMS-71A фірми Inorganic Ventures, USA. Промивання мас-спектрометра між окремими пробами проводили 2% розчином азотної кислоти. Внутрішній стандарт – 1 ppm розчин Sc фірми Inorganic Ventures, USA.

За детектування неорганічних елементів методом ICP-MS виникають численні поліатомні спектральні інтерференції, що накладаються на піки окремих елементів та заважають їхньому коректному визначенню. Наприклад, $^{75}\text{As} - ^{40}\text{Ar}^{35}\text{Cl}$, $^{40}\text{Ca}^{35}\text{Cl}$; $^{56}\text{Fe} - ^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}$, $^{40}\text{Ca}^{16}\text{O}$. Тому детектування неорганічних елементів проводили в режимі продувки гелієм з метою уникнення хибних вимірювань.

Таблиця 1

Умови детектування неорганічних елементів за вимірювання на ICP-MS Agilent 7700x у зерні рису

Маса елемента	Елемент	Час інтегрування/ маса, с	Кількість незалежних вимірювань/варіант
09	Берилій	0,3	3
55		0,3	3
56	Залізо	0,3	3
63	Мідь	0,3	3
66	Цинк	0,3	3
75	Арсен	1,00	3
88	Стронцій	0,3	3
108	Кадмій	1,00	3
135	Барій	0,3	3
208	Свинець	0,3	3
238	Уран	0,3	3

Калібрування мас-спектрометра проводили по кожному елементу. Типовий калібрувальний графік на прикладі As наведено на рис. 1.

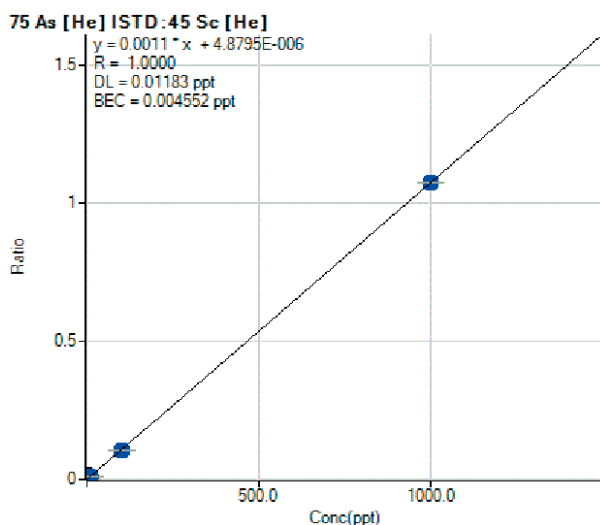


Рис. 1. Калібрувальний графік для детектування арсену на мас-спектрометрі Agilent 7700x

Результати досліджень

За краплинного зрошення вміст арсену, який є високотоксичним для людини агентом, у зерні сортів 'Віконт' і 'Консул' зменшувався більш ніж у три рази порівняно з зерном рису, яке отримано за поливу затопленням (табл. 2). Для сорту 'Віконт' при затопленні вміст цього елемента в зерні становив 393,5, а за краплинного зрошення – 106,5 мкг/кг. Це можна пояснити тим, що мобільність As в анаеробних ґрунтових умовах помітно відрізняється від аеробних. За умов затоплення утворюються анаеробні умови, що сприяють зростанню поглинання рослинами токсичних елементів. Арсен знаходиться в агрофітоценозі в різних органічних і неорганічних формах. Найпоширенішими неорганічними формами є арсенат As (V) і арсенат As (III).

Монометиларсенова та диметиларсенова кислота є найпоширенішими органічними сполуками арсену в ґрунті, однак їхній вміст у агрофітоценозах є низьким у порівнянні з вмістом неорганічного арсену. В аеробних умовах частка As (V) є домінуючою, у той час як As (III) переважає у зразках ґрунту за анаеробних умов [7, 8]. При цьому присутність доступних для рослин фосфатів у ґрунті є важливим фактором, що інгібує засвоєння сполук арсену рослинами рису. Проте, фосфати не перешкоджають надходженню As (III) в рослини. Максимальна адсорбція As (V) рослинами спостерігається при pH 4, у той час як для As (III) максимум спостерігається при pH 7,0–8,5 [5, 14]. Тому в анаеробних умовах арсен активніше поглинається рослинами рису.

Таким чином, у наших дослідженнях і в роботах (Hughes M. F. et al.; Garbinski L. D. et al.; Rauf M. A. et al.; Althobiti R. A. et al.) [3, 4, 7, 8] з визначення рівнів накопичення високотоксичного для людини арсену показано, що особливості сорту і технологій вирощування є визначальними факторами регуляції вмісту токсиканту в зерні. Варто зазначити, що створення аеробних умов вирощування культури є ключовим для роботи транспортних систем рослин й суттєвого зниження вмісту арсену в зерні рису.

Щодо вмісту інших токсичних елементів, то в зерні рису не було знайдено берилію, хоча відомо про вміст берилію на рівні часток ppm у ґрунті. Вміст барію у зерні рису сорту 'Віконт' дещо збільшувався, у зерні сорту 'Консул' – знижувався. Встановлені відмінності в накопиченні барію можуть впливати на редокс-гомеостаз рослин про-

**Вміст важких металів (мкг/кг) та мікроелементів –
складових редокс-систем (мг/кг) у зерні сортів рису за різних умов зрошення**

Сорт	Спосіб зрошення	Be	Ba	Sr	Cd	As	Pb	U	Cu	Fe	Mn	Zn
'Віконт'	затоплення	0	2136	1651	54,3	393,5	336	18,0	2,5	337	88	21,9
	крапельне	0	2632	2047	228,7	106,5	240	2,6	6,3	288	355	31,4
'Консул'	затоплення	0	1171	916	18,4	271,3	113	0,9	1,9	215	47	14,6
	крапельне	0	929	1274	153,4	87,2	112	0,8	4,4	199	213	20,1
НІР _{0,05}		–	32	19	23,1	11,9	18	0,5	0,1	12	11	1,4

тягом проростання, тому що підвищення вмісту барію може зв'язувати пули вільних сульфатів у рослинах.

Уміст кадмію та стронцію за краплинного зрошення хоча й збільшувався, але знаходився на рівні нижче токсикологічних нормативів. Підвищення накопичення даних елементів може бути обумовлено кращими умовами функціонування транспортних переносників на плазмалемі рослин за аеробних умов вирощування рису. Дослідження (Gu J.-F. et al.) [15] показали, що за введення в ґрунт цеоліту вміст арсену та кадмію у рослинах рису знижувався. Тому, встановлена в досліді особливість підвищення накопичення кадмію та стронцію за краплинного зрошення зумовлює використання у технологіях вирощування рису лише фосфорних добрив з якісної сировини, з низькими рівнями присутності кадмію та радіонуклідів.

За краплинного зрошення також активніше накопичувалися й інші біологічно важливі метали. Вміст міді збільшився в 2,3–2,5 рази, цинку – у 1,5 рази. Необхідно відзначити значне збільшення накопичення марганцю у зерні рису сорту 'Віконт' – у 4,4 рази, а в сорту 'Консул' – у 8,5 разів. Збільшення вмісту марганцю у рослинах на ґрунтах Півдня України за краплинного зрошення свідчить про суттєво вищі рівні ефективності використання макро- та мікроелементів в умовах зростання накопичення марганцю, який за звичайних умов є дефіцитним для рослин у регіоні. Зазначимо, що уміст марганцю у зерні рису знаходиться у межах від 2000 до 400000 мкг/кг, міді – від 2000 до 20000 мкг/кг [16].

Уміст заліза в зерні обох сортів дещо знизився за краплинного зрошення. Раніше було показано, що присутність доступних форм заліза у ґрунті є важливою складовою інгібування надходження арсену до рослин рису та накопичення токсиканту в зерні. Посилення накопичення інших мікроелементів за краплинного зрошення може підвищувати доступність заліза в агрофітоценозі з відповідним виключно важливим

зниженням високотоксичного арсену в зерні рису [17].

Урожайність сортів рису була вищою при вирощуванні на затоплених ґрунтах. У сортів 'Віконт' і 'Консул' при затопленні вона була на рівні 9,35 та 11,76 т/га відповідно, а за краплинного зрошення – 6,80 й 9,30 т/га (табл. 3). Тобто різниця в урожайності становила 2,55 т/га в сорту 'Віконт' і 2,46 т/га в сорту 'Консул' за переваги затоплення як способу зрошення. Також потрібно відзначити, що величина зольності/сумарний вміст хімічних елементів була істотно нижчою у сорту 'Консул'.

Таблиця 3

Урожайність сортів рису залежно від способів зрошення, т/га (середнє за 2016–2017 рр.)

Сорт	Спосіб зрошення	
	затоплення	краплинне зрошення
'Віконт'	9,35	6,80
'Консул'	11,76	9,30
НІР _{0,05}	1,10	0,70

За краплинного зрошення в умовах дослідів спостерігалось зниження продуктивності посівів рису. При цьому, у зерні рису було визначено суттєво нижчі рівні накопичення токсичного для людини арсену.

Висновки

Природна контамінація урожаю рису арсеном суттєво обмежує харчову цінність культури. Впровадження крапельного поливу посівів рису дозволяє суттєво знизити рівні накопичення високотоксичного арсену в зерні, що особливо важливо для продуктів дієтичного та дитячого харчування. При цьому встановлено й зниження врожайності культури.

Визначене за крапельного поливу зростання накопичення кадмію та стронцію обумовлює високі вимоги до якості фосфорних добрив, що застосовуються у технологіях вирощування рису.

Впровадження крапельного поливу створює аеробні умови вирощування та опти-

мізує надходження іонів, що призводить до зростання накопичення мікроелементів – компонентів редокс-систем рослин. Виключенням є невелике зниження вмісту заліза, що, ймовірно, пов'язано із активністю механізмів інгібування надходження арсену до зерна рису.

За крапельного поливу спостерігалось посилення накопичення біологічно важливих металів у зерні рису сортів 'Віконт' і 'Консул' та зниження накопичення високо-токсичного арсену.

Використана література

1. Моргун В. В., Швартау В. В., Киризий Д. А. Физиологические основы формирования высокой продуктивности зерновых злаков. *Физиология и биохимия культ. растений*. 2010. Т. 42, № 5. С. 371–392.
2. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. (Eds.). Cambridge : Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
3. Hughes M. F., Beck B. D., Chen Y. et al. Arsenic exposure and toxicology: a historical perspective. *Toxicol Sci*. 2011. Vol. 123, No. 2. P. 305–332. doi: 10.1093/toxsci/kfr184
4. Garbinski L. D., Rosen B. P., Chen J. Pathways of arsenic uptake and efflux. *Environ Int*. 2019. Vol. 126. P. 585–597. doi: 10.1016/j.envint.2019.02.058
5. Kalita J., Pradhan A. K., Shandilya Z. M., Tanti B. Arsenic Stress Responses and Tolerance in Rice: Physiological, Cellular and Molecular Approaches. *Rice Sci*. 2018. Vol. 25, Iss. 5. P. 235–249. doi: 10.1016/j.rsci.2018.06.007
6. Upadhyay M. K., Shukla A., Yadav P., Srivastava S. A review of arsenic in crops, vegetables, animals and food products. *Food Chem*. 2019. Vol. 276. P. 608–618. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.10.069
7. Rauf M. A., Hakim M. A., Hanafi M. M. et al. Bioaccumulation of arsenic (As) and phosphorous by transplanting Aman rice in arsenic-contaminated clay soils. *Aust. J. Crop Sci*. 2011. Vol. 5, Iss. 12. P. 1678–1684.
8. Althobiti R. A., Sadiq N. W., Beauchemin D. Realistic risk assessment of arsenic in rice. *Food Chem*. 2018. Vol. 257. P. 230–236. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.03.015
9. Costa B. E. S., Coelho L. M., Araujo C. S. T. et al. Analytical Strategies for the Determination of Arsenic in Rice. *J. Chem*. 2016. Article ID 1427154. P. 1–11. doi: 10.1155/2016/1427154
10. Suriyagoda L. D. B., Dittert K., Lambers H. Mechanism of arsenic uptake, translocation and plant resistance to accumulate arsenic in rice grains. *Agr. Ecosyst. Environ*. 2018. Vol. 253. P. 23–37. doi: 10.1016/j.agee.2017.10.017
11. Jain N., Chandramani S. Arsenic poisoning. An overview. *Indian J. Med. Spec*. 2018. Vol. 9, Iss. 3. P. 143–145. doi: 10.1016/j.injms.2018.04.006
12. Londonio A., Morzan E., Smichowski P. Determination of toxic and potentially toxic elements in rice and rice-based products by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Food Chem*. 2019. Vol. 284. P. 149–154. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.01.104
13. Похилько С. Ю., Швартау В. В., Михальская Л. Н., Дуган А. М., Моргун В. В. ICP-MS анализ мягкой пшеницы с геном *GPC-B1* от *Triticum turgidum* spp. *dicoccoides*. *Biotechnol. Acta*. 2016. Vol. 9, Iss. 5. P. 65–69. doi: 10.15407/biotech9.05.065
14. Dahlawi S., Saad N. A., Iqbal M. et al. Opportunities and challenges in the use of mineral nutrition for minimizing arsenic toxicity and accumulation in rice: A critical review. *Chemosphere*. 2018. Vol. 194. P. 171–188. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.11.149

15. Gu J.-F., Zhou H., Tang H.-L. et al. Cadmium and arsenic accumulation during the rice growth period under *in situ* remediation. *Ecotoxicol. Environ. Saf*. 2019. Vol. 171. P. 451–459. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.003
16. Mahimairaja S., Bolan N. S., Adriano D. C. Robinson B. Arsenic contamination and its risk management in complex environmental settings. *Adv. Agron*. 2005. Vol. 86. P. 1–82. doi: 10.1016/S0065-2113(05)86001-8
17. Smedley P. L., Kinniburgh D. G. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem*. 2002. Vol. 17, Iss. 5. P. 517–568. doi: 10.1016/S0883-2927(02)00018-5

References

1. Morgun, V. V., Schwartau, V. V., & Kiriziy, D. A. (2010). Physiological fundamentals of grain cereals high productivity forming. *Fiziol. Biokhim. Kul't. Rast.* [Physiology and Biochemistry of Cultivated Plants], 42(5), 371–392. [in Russian]
2. Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... Midgley, P. M. (Eds.). (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
3. Hughes, M. F., Beck, B. D., Chen, Y., Lewis, A. S., & Thomas, D. J. (2011). Arsenic exposure and toxicology: a historical perspective. *Toxicol Sci.*, 123(2), 305–332. doi: 10.1093/toxsci/kfr184
4. Garbinski, L. D., Rosen, B. P., & Chen, J. (2019). Pathways of arsenic uptake and efflux. *Environ Int.*, 126, 585–597. doi: 10.1016/j.envint.2019.02.058
5. Kalita, J., Pradhan, A. K., Shandilya, Z. M., & Tanti, B. (2018). Arsenic Stress Responses and Tolerance in Rice: Physiological, Cellular and Molecular Approaches. *Rice Sci.*, 25(5), 235–249. doi: 10.1016/j.rsci.2018.06.007
6. Upadhyay, M. K., Shukla, A., Yadav, P., & Srivastava, S. (2019). A review of arsenic in crops, vegetables, animals and food products. *Food Chem.*, 276, 608–618. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.10.069
7. Rauf, M. A., Hakim, M. A., Hanafi, M. M., Islam, M. M., Rahman, G. K., & Panaullah, G. M. (2011). Bioaccumulation of arsenic (As) and phosphorous by transplanting Aman rice in arsenic-contaminated clay soils. *Aust. J. Crop Sci.*, 5(12), 1678–1684.
8. Althobiti, R. A., Sadiq, N. W., & Beauchemin, D. (2018). Realistic risk assessment of arsenic in rice. *Food Chem.*, 257, 230–236. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.03.015
9. Costa, B. E. S., Coelho, L. M., Araujo, C. S. T., Rezende, H. C., & Coelho, N. M. M. (2016). Analytical Strategies for the Determination of Arsenic in Rice. *J. Chem.*, 2016, 1–11. doi: 10.1155/2016/1427154
10. Suriyagoda, L. D. B., Dittert, K., & Lambers, H. (2018). Mechanism of arsenic uptake, translocation and plant resistance to accumulate arsenic in rice grains. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 253, 23–37. doi: 10.1016/j.agee.2017.10.017
11. Jain, N., & Chandramani, S. (2018). Arsenic poisoning. An overview. *Indian J. Med. Spec.*, 9(3), 143–145. doi: 10.1016/j.injms.2018.04.006
12. Londonio, A., Morzan, E., & Smichowski, P. (2019). Determination of toxic and potentially toxic elements in rice and rice-based products by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Food Chem.*, 284, 149–154. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.01.104
13. Pokhylko, S. Yu., Schwartau, V. V., Mykhalska, L. M., Dugan, O. M., & Morgun, B. V. (2016). ICP-MS analysis of bread wheat carrying the *GPC-B1* gene of *Triticum turgidum* ssp. *dicoccoides*. *Biotechnol. Acta*, 9(5), 64–69. doi: 10.15407/biotech9.05.064 [in Russian]
14. Dahlawi, S., Saad, N. A., Iqbal, M., Farooq, M. A., Bibi, S., & Rengel, Z. (2018). Opportunities and challenges in the use of mineral nutrition for minimizing arsenic toxicity and accumulation in rice: A critical review. *Chemosphere*, 194, 171–188. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.11.149

15. Gu, J.-F., Zhou, H., Tang, H.-L., Yang, W.-T., Zeng, M., Liu, Z.-M., Peng, P.-Q., & Liao, B.-H. (2019). Cadmium and arsenic accumulation during the rice growth period under in situ remediation. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 171, 451–459. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.003
16. Mahimairaja, S., Bolan, N. S., Adriano, D. C., & Robinson, B. (2005). Arsenic contamination and its risk management in complex environmental settings. *Adv. Agron.*, 86, 1–82. doi: 10.1016/S0065-2113(05)86001-8
17. Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.*, 17(5), 517–568. doi: 10.1016/S0883-2927(02)00018-5

УДК 633.18.03:549.241

Швартау В. В.^{1*}, Михальская Л. Н.¹, Дудченко В. В.², Скидан В. О.² Содержание неорганических элементов в зерне риса в зависимости от способов орошения // *Plant Varieties Studying and Protection*. 2019. Т. 15, № 4. С. 417–423. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.15.4.2019.188718>

¹Институт физиологии растений и генетики НАН Украины, ул. Васильковская, 31/17, г. Киев, 03022, Украина, *e-mail: VictorSchwartau@gmail.com

²Институт риса НААН Украины, с. Антоновка, Скадовский р-н, Херсонская обл., 75705, Украина

Цель. Исследовать содержание тяжелых металлов в зерне двух сортов риса при разных условиях полива. Оценить содержание основных микроэлементов – компонентов редокс-систем растений в зерне риса для биофортификации и ингибирования накопления тяжелых металлов. **Методы.** Растения сортов риса ‘Консул’ и ‘Виконт’ выращивали на опытных полях Института риса НААН Украины при поливе затоплением или капельным орошением. Образцы зерна до элементного анализа сжигали в азотной кислоте на системе микроволновой подготовки проб Milestone Start D. Определение содержания неорганических элементов проводили методом мас-спектрометрии с индивидуально связанной плазмой (ICP-MS) на Agilent 7700x в режиме продувки гелием. **Результаты.** Внедрение капельного полива в сравнении с поливом затоплением привело к снижению накопления арсена в зерне в 2,3–3,0 раза. При этом установлено увеличение накопления кадмия и стронция. При капельном поливе увеличилось накопление также микроэлементов – составных редокс-систем растений (меди, цинка, марганца). Небольшое снижение содержания железа при этом может быть связано с активацией механизмов блокирования поступления и перераспределения арсена в зерно. Урожайность сортов риса была выше при затоплении. У сортов ‘Виконт’ и ‘Консул’ при затоплении она была на уровне 9,35 и 11,76 т/га, а при капельном орошении – 6,80 и 9,30 т/га соот-

ветственно. Суммарное содержание неорганических элементов было существенно ниже у сорта ‘Консул’. Вероятно, это связано с относительным снижением элементов в биомассе при высокой продуктивности данного сорта. **Выводы.** Естественная контаминация урожая риса арсеном существенно ограничивает пищевую ценность культуры. Внедрение капельного полива посевов риса позволяет существенно снизить уровни накопления высокотоксичного арсена в зерне, что особенно важно для продуктов детского питания. Определенное при капельном поливе повышение накопления кадмия и стронция обуславливает высокие требования к качеству фосфорных удобрений, которые применяются в технологиях выращивания культуры. Внедрение капельного полива оптимизирует аэробные условия поступления ионов, что приводит к повышению накопления микроэлементов – компонентов редокс-систем растений. Исключением является незначительное снижение содержания железа, что, вероятно, связано с активацией механизмов ингибирования поступления арсена в зерно риса. При этом наблюдается небольшое снижение продуктивности посевов. Таким образом, при капельном поливе наблюдается усиление накопления биологически важных металлов в зерне риса и снижение накопления высокотоксичного арсена.

Ключевые слова: арсен; тяжелые металлы; микроэлементы; спектроскопия; ICP-MS.

UDC 663.18.03:549.241

Schwartau, V. V.^{1*}, Mykhalska, L. M.¹, Dudchenko, V. V.², & Skydan, V. O.² (2019). Content of inorganic elements in rice grain depending on irrigation methods. *Plant Varieties Studying and Protection*, 15(4), 417–423. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.15.4.2019.188718>

¹Institute of Plant Physiology and Genetics, NAS of Ukraine, 31/17 Vasylykivska St., Kyiv, 03022, Ukraine, *e-mail: VictorSchwartau@gmail.com

²Institute of Rice, NAAS of Ukraine, Antonivka, Skadovsk district, Kherson region, 75705, Ukraine

Purpose. To study the content of heavy metals in the grain of two varieties of rice under different irrigation conditions. To estimate the content of basic microelements – components of redox systems of plants in the grain of rice for biofortification and inhibition of heavy metal accumulation. **Methods.** Plants of rice varieties ‘Consul’ and ‘Viscount’ were grown on the experimental fields of the Rice Institute of NAAS of Ukraine during flooding or drip irrigation. Grain samples were digested for analysis by microwave sample preparation in nitric acid on Milestone Start D. The content of inorganic elements was determined by ICP-MS method on Agilent 7700x in helium

flow mode. Calibration solutions from Inorganic Ventures, USA were used. **Results.** Compared to flood irrigation, the introduction of drip irrigation leads to a 2.3–3 times decrease in the accumulation of arsenic in the grain. The increase in cadmium and strontium accumulation was found. Drip irrigation also increases the accumulation of trace elements in grain – components of redox systems of plants (copper, zinc, manganese). A slight decrease in iron content is probably associated with the activation of mechanisms for blocking the inflow and relocation of arsenic into the grain. The yield of rice varieties was higher during flooding. In the case of ‘Viscount’ and ‘Consul’, it was 9.35 and

11.76 t/ha in the case of flooding, and 6.80 and 9.30 t/ha in the case of drip irrigation, respectively. The total inorganic elements/ash content is significantly lower in the variety 'Consul'. This is probably due to the dissolution of elements in the biomass with high productivity of this variety.

Conclusions. The natural contamination of rice crops with arsenic limits the nutritional value of the crop. The introduction of drip irrigation of rice crops significantly reduces the accumulation of highly toxic arsenic in the grain, which is especially important for children food. The increase in cadmium and strontium accumulation determined by drip irrigation leads to high requirements for the quality of phosphate fertilizers used in crop

cultivation technologies. Introduction of drip irrigation optimizes the aerobic conditions of ion supply, which leads to increased accumulation of trace elements – components of redox systems of plants. The only exception is a slight decrease in iron content, which is probably associated with the activation of mechanisms of inhibition of the inflow of arsenic to the grain of rice. At the same time, there is a slight decrease in the productivity of crops. Thus, under drip irrigation there is an increase in the accumulation of biologically important metals and a decrease in the accumulation of highly toxic arsenic.

Keywords: arsenic; heavy metals; trace elements; spectroscopy; ICP-MS.

Надійшла / Received 5.12.2019
Погоджено до друку / Accepted 16.12.2019