

ВПЛИВ НЕОРГАНІЧНИХ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН НА РАДІОСТІЙКІСТЬ НАСІННЯ**Б. В. СІНЕНКО**, аспірант, <https://orcid.org/0000-0003-4187-4372>*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

E-mail: bogdan.sinenko@gmail.com

[https://doi.org/10.31548/dopovidi3\(103\).2023.003](https://doi.org/10.31548/dopovidi3(103).2023.003)

Анотація. Іонні неорганічні сполуки можуть впливати на радіостійкість рослин. Є багато досліджень, що описують ефекти тих чи інших сполук та намагаються пояснити механізм їх дії. Але огляд сучасних досліджень показав нестачу в комплексному аналізі концентрацій та впливу іонних сполук на насіння під час опромінення. У зв'язку з цим, метою дослідження було зібрати та структурувати цей матеріал для кращого розуміння механізмів дії. Результатом роботи стала аналітична таблиця ефектів взаємодій катіонів і аніонів при обробці насіння перед опроміненням рентгенівським та γ -випромінюванням. Також, було окреслено основні закономірності впливу іонних солей з прикладами їх застосування. Так галогеніди лужних та лужноземельних металів мають сильний радіозахисний ефект. Вплив сульфатів та двовалентних металів залежить від їх концентрації та взаємодії з клітинними структурами. Нітрати важких металів та азидів негативно впливають на радіостійкість насіння рослин. Ефект від дії катіонів залежить значною мірою від хімічних та фізіологічних властивостей. Водночас комплекси металів з високим протонним числом можуть виступати в якості сенсibilізаторів внаслідок фізичних ефектів продуктів фізіологічного обміну рослин. На основі проаналізованої інформації можна зробити висновок, що вплив простих неорганічних солей потребує додаткової уваги та поглибленого дослідження. У перспективі, вивчення ефекту від їх застосування може допомогти в розумінні загальних закономірностей радіозахисту рослин. А також у фундаментальному розумінні взаємозв'язку між ґрунтовим розчином солей на засолених ґрунтах та його впливом на радіостійкість рослин.

Ключові слова: насіння, рослини, неорганічні речовини, іони, рентгенівське випромінювання, γ -випромінювання

Актуальність. Вплив неорганічних речовин на радіостійкість рослин є важливою проблемою й потребує додаткової уваги, оскільки вони можуть модифікувати чутливість рослин до іонізуючого випромінювання при підготовці насіння до сівби, а також у

разі опромінення безпосередньо в ґрунті, внаслідок радіаційних аварій та імовірних ядерних конфліктів. Оскільки багато класичних добрив (нітратні, фосфатні, калійні) є неорганічними водорозчинними речовинами, й щорічно надходять у ґрунт, їх дія матиме безпосередній

Сіненко Б. В.

вплив на радіостійкість проростаючих рослин. Початкова оцінка проведених досліджень дозволить уникнути повторів та визначити межі додаткового вивчення проблеми.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Було проведено огляд сучасних наукових робіт з радіозахисту та радіосенсибілізації рослин (Duarte et al., 2023; Georgieva & Vassileva, 2023; Gudkov et al., 2019), але комплексного літературного огляду щодо впливу неорганічних іонних сполук на радіостійкість насіння знайдено не було.

Мета. Метою роботи був збір та систематизація інформації щодо впливу водорозчинних неорганічних іонних сполук на радіостійкість насіння.

Методи. Було проведено збір, обробку та аналіз наукового матеріалу. Для концептуалізації матеріалу було обрано формат, подібний до таблиці розчинності солей.

Результати. Використання хімічних речовин перед та після опромінення може модифікувати дію іонізуючого випромінювання. Але при їх застосуванні слід враховувати й інші фактори, що можуть вплинути: рН (Lunec & Parker, 1980; Sideris et al., 1973), осмотичний тиск розчину (Osterrieth, 1963) та вологість насіння (Baek et al., 2003). Всі ці чинники можуть вплинути на сукупний показник радіостійкості насіння.

Важливо враховувати й сумісність хімічних факторів. Додаткове використання речовин, які впливають на чутливий до надлишку солей протеїн (SOS1), що активує обмінники Na^+/H^+ (NHXs), може призвести до додаткових ушкоджень внаслідок осмотичного та сольового стресу (Keisham et al., 2018).

Також деякі речовини, навіть в дуже низьких концентраціях (10^{-2} – 10^{-3} М), можуть посилювати пошкодження ДНК, підвищуючи радіочутливість клітин (Osterrieth, 1963).

1. Вплив аніонів

Галогеніди лужних та лужноземельних металів чинять сильний радіозахисний ефект.

Витримування насіння ячменю (*Hordeum vulgare* L.) впродовж 12 годин в 0,5 М розчинах KCl, NaCl, CaCl_2 , BeCl_2 , SrCl_2 та BaCl_2 підвищує радіостійкість при гострому опроміненні в діапазоні доз від 0 до 105,2 Гр (Gillet et al., 1963). Але дані про радіозахисну дію BaCl_2 на різні види рослин достатньо суперечливі (Gillet et al., 1963) й потребують додаткового дослідження.

Використання CaCl_2 у концентраціях від 0,06 М до 1 М за 1 годину до γ -опромінення у дозі 175,4 Гр знижує негативний вплив (Conger, 1975).

Намочування насіння ячменю в 0,1 М розчині SnCl_2 продовж 16 годин перед рентгенівським опромінюванням в дозі 43,9 Гр значно

Сіненко Б. В.

знижувало відсоток проростання, але дещо збільшувало довжину 10-денних проростків (Biswas & Matsuo, 1966).

Обробка ячменю 0,1 М розчином KBr впродовж 20 годин перед рентгенівським опромінюванням в дозі 131,5 Гр має радіозахисну дію. Розчин 0,1 М підвищує довжину 10-денних проростків на 31%, а 0,5 М знижує кількість хромосомних аберацій в меристемах коренів на 75% порівняно з намоченими у воді (з 366 до 93 на 800 клітин) (Biswas & Matsuo, 1966).

Розчини сполук йоду 0,5 М KI, 0,05 М NaI та 0,05 М KIO₃ підвищує довжину проростків на 72%, 15% та 8% відповідно (Biswas & Matsuo, 1966).

Використання 0,5 М KН₂РO₄ зменшує кількість хромосомних аберацій та загальну кількість аномальних клітин у меристемах коренів ячменю (Biswas & Matsuo, 1966).

Застосування Na₂S₂O₄ дещо підвищувало довжину проростків, але на дві третини знижувало схожість ячменю (Biswas & Matsuo, 1966). Негативний вплив на схожість може бути пов'язаний з сильним відновним ефектом, який чинить дітіоніт натрію (Božić & Kokol, 2008). Водночас зменшення пошкоджень у рослин, що вижили, може бути наслідком відновлення вільних радикалів.

Захисний вплив сульфатів двовалентних металів залежить від

концентрації та їх хімічної взаємодії з клітинними структурами.

Намочування насіння кроталарії (*Crotalaria intermedia* Kotschy) в 0,01 М розчинах MnSO₄, ZnSO₄ та MgSO₄ й подальше висушування не мало статистично значущого впливу на зміну чутливості до рентгенівського випромінювання (Bhatia, 1967). Збільшення концентрації розчинів до 0,2 М в дослідах з ячменем призводило до прояву слабого радіозахисного ефекту (Hazama et al., 1963), але він був дуже нестійким й сильно залежав від складу повітря та вологості.

Розчин CuSO₄ за тих же умов підвищував радіосенсибілізацію. Імовірно, внаслідок зв'язування іонів міді з ДНК і макромолекулами, що підвищувало їх чутливість до вільних радикалів (Bhatia, 1967). Обробка 0,1 М розчином FeSO₄ підвищувало довжину ростків на 42%, але його захисна дія зумовлена, значною мірою, іонами заліза (Biswas & Matsuo, 1966).

Нітрати важких металів негативно впливають на радіостійкість насіння.

Обробка насіння ячменю впродовж 7 годин 0,2 М розчинами Ba(NO₃)₂, Pb(NO₃)₂ і UO₂(NO₃)₂ за 15 годин до рентгенівського опромінення призводила до появи 6,62%, 6,77%, та 5,67% летальних мутацій хлорофілу серед проростків. Дія іонізуючого випромінювання на контрольну групу було причиною

Сіненко Б. В.

2,78% мутацій. За відсутності опромінення, як і при застосуванні лише розчину $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$, появи летальних мутацій не помічалось (Stadler, 1928).

Застосування NaN_3 для обробки насіння призводить до посилення радіосенсибілізації (Jahan et al., 2020). Він є сильним мутагеном (Yafizham & Herwibawa, 2018), що індукує мутації основних ознак (Gruszka et al., 2012; Hossein pour et al., 2022) у багатьох видів рослин (Yafizham & Herwibawa, 2018). Його ефективність залежить від рН розчину й збільшується при переході від лужного до кислого середовища (Sideris et al., 1973), досягаючи максимальної ефективності при рН 3 (Gruszka et al., 2012).

Азид натрію призводить до накопичення гідрогенпероксидази, що інгібує каталазу та пероксидазу (Kleinhofs et al., 1975). Потрапляючи в клітини рослин, він метаболізує до мутагенного агента, аналога амінокислот, L-азидоаланіну ($\text{N}_3\text{-}$

$\text{CH}_2\text{-CH}(\text{NH})_2\text{-COOH}$). Продуктування цього метаболіту відбувається за участі O-ацетилсеринсульфгідрилази, що каталізує конденсацію сульфїду або азиду з O-ацетилсерином, що призводить до утворення L-цистеїну чи азидоаланіну відповідно (Khan et al., 2009).

Його використання, як сам по собі, так і при опроміненні насіння іонізуючим випроміненням, призводить до підвищення кількості мутацій, у тому числі й летальних.

Намочування насіння ячменю на 1 годину в розчині аскорбінової кислоти після витримання 2 години в розчині NaN_3 зменшує пошкодження після γ -опромінення ^{60}Co . Водночас вплив аскорбінової кислоти впродовж 1 години перед 2-годинною обробкою NaN_3 не дає значного результату в зменшенні пострадіаційних пошкоджень (Conger, 1973).

Загальний вплив відомих комбінації катіонів та аніонів приведено на рисунку 1.

	K ⁺	Na ⁺	Be ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Sr ²⁺	Ba ²⁺	Sn ²⁺	Cu ²⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Fe ³⁺	Pb ²⁺	UO ₂ ²⁺
Cl ⁻	+	+	+	+	+	+	+	+						
Br ⁻	+													
I ⁻	+	+												
IO ₃ ⁻	+													
H ₂ PO ₄ ²⁻	+													
S ₂ O ₄ ²⁻	+													
SO ₄ ²⁻					○				-	○	○	+		
NO ₃ ⁻							-						-	-
N ₃ ⁻		-												

Рис. 1. Вплив неорганічних солей на радіостійкість насіння: позитивний (+), не впливає (○), негативний (-)

2. Вплив катіонів

Вплив іонів металів на радіозахисний ефект залежить, значною мірою від їх хімічних властивостей та фізіологічних функцій.

Насичений розчин EDTA-2Na є ефективним радіопротектором. Використання EDTA та EDTA-2Mg-Na не мало захисного ефекту при опроміненні ячменю рентгенівським випромінюванням (Biswas & Matsuo, 1966). Це доводить, що основна частка захисного впливу належить іонам натрію. Захисний ефект високої концентрації Na⁺ можна пояснити осмотичним та сольовим стресом, що призводить до дегідратації клітин (Keisham et al., 2018).

Сполуки калію, особливо з галогенами, підвищують радіостійкість ячменю та рису (*Oryza sativa* L.). Це може бути пов'язано з підвищенням проникності клітинних

мембран під час опромінення, що призводить до втрати іонів калію та інгібуванню росту (Biswas & Matsuo, 1966). Попередня обробка препаратами калію компенсує його втрату та пришвидшує процеси відновлення радіоіндукованих пошкоджень (Biswas & Matsuo, 1966).

Захисний ефект катіонів кальцію базується на дегідратації насіння та зародка, інгібуванні притоку позаклітинних іонів натрію та підтримці внутрішньоклітинного балансу калію та натрію (Chen et al., 2021).

Іони срібла можуть мати сенсibilізуючу дію на ДНК під час опромінення рентгенівським опроміненням в атмосфері азоту. У той час, як в атмосфері кисню цей ефект незначний або проявляється при дуже високих концентраціях Ag⁺ (Held & Powers, 1980).

Іншими ефективними радіосенсибілізаторами можуть бути комплекси з двовалентними іонами платини, такі як цис-дихлорбіс (циклопентиламін) платини II (Szumiel, 1978), що використовується в променевої терапії. В процесі росту рослини можуть відновлювати іони платини утворюючи наночастинки, що можуть призводити до подібного ефекту (Asztemborska et al., 2015; Bali et al., 2010; Song et al., 2010).

Наночастинки металів з високим Z (числом протонів в ядрі) можуть використовуватися як ефективні радіосенсибілізатори. Перебуваючи всередині клітин під час опромінення, вони вивільняють потік вторинних електронів збільшуючи точкові пошкодження внаслідок локального накопичення енергії (Hullo et al., 2021).

Дія наночастинок платини, золота, гадолінію та гафнію підвищує чутливість пухлин до променевої терапії (Hullo et al., 2021), але їх дія на рослинні клітини під час опромінення недостатньо вивчений.

Висновки і перспективи. Дія найбільш активних груп хімічних неорганічних іонних сполук достатньо вивчена для створення первинної структури таблиці та підходів до концептуалізації результатів подальших досліджень.

Галогеніди, дигідрофосфати та дітїоніди можуть мати радіозахисний захисний ефект, у той час, як нітрати – сенсибілізуючий. Ефект впливу

сульфатів потребує додаткового дослідження, оскільки він сильно модифікується впливом активного катіона.

Катіони кальцію, натрію, калію, заліза та, частково, стронцію, здатні чинити захисну дію внаслідок прямої дії на фізіологічні механізми рослини та процеси осмотичної регуляції. Іони магнію, мангану та цинку не мають яскраво вираженої захисної дії, тому вплив солі головним чином залежить від дії залученого аніона. Катіони міді мають радіосенсибілізуючу дію через зв'язування з ДНК та макромолекулами. Ефект від впливу катіонів стронцію, барію, та олова потребує додаткового вивчення, оскільки він або має неявні прояви, або сильно піддається модифікації аніона.

Потенційно, іони металів з високим протонним числом, такі як платина, золото, гадоліній, гафній та інші, здатні утворювати наночастинки в рослинах, що можуть стати джерелом вторинних електронів призводячи до точкових уражень.

Вивчення впливу комбінацій катіонів та аніонів, а також їх подальшого впливу, потребує додаткової уваги. Детальніше дослідження цих ефектів допоможе у формуванні стратегій радіаційного захисту рослин в разі радіаційних аварій та ядерних інцидентів. А також в розумінні ролі розчинних неорганічних елементів ґрунту на

Сіненко Б. В.

радіостійкість рослин на початкових етапах росту.

Список використаних джерел

1. Duarte G.T., Volkova P.Y., Fiengo Perez F., Horemans N. Chronic Ionizing Radiation of Plants: An Evolutionary Factor from Direct Damage to Non-Target Effects. *Plants*. 2023. Vol. 12. No. 5 P. 1–27.
2. Georgieva M., Vassileva V. Stress Management in Plants: Examining Provisional and Unique Dose-Dependent Responses. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24. No. 5105. P. 1–25.
3. Gudkov S.V., Grinberg M.A., Sukhov V., Vodenev V. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019. Vol. 202. P. 8–24.
4. Lunec J., Parker R. The Influence of pH on the Enhancement of Radiation Damage by Hyperthermia. *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*. 1980. Vol. 38. No. 5. P. 567–574.
5. Sideris E.G., Nilan R.A., Bogyo T.P. Differential effect of sodium azide on the frequency of radiation-induced chromosome aberrations vs. the frequency of radiation-induced chlorophyll mutations in *Hordeum vulgare*. *Radiation Botany*. 1973. Vol. 13. No. 6. P. 315–322.
6. Osterrieth P.M. Induction par les Rayons X de la Destruction de L'acide Désoxyribonucléique d'*Escherichia Freundii* Induction par les Rayons X de la Destruction de L'acide Désoxyribonucléique d'*Escherichia Freundii*. *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*. 1963. Vol. 6. No. 3. P. 289–296.
7. Baek M.-H., Lee Y.-K., Lee Y.-B., Yang S.-G., Kim J.-S. Effects of Low Dose Gamma Radiation and Seed Moisture Content on Germination and Early Growth of Vegetable Crops. *Korean Journal of Environmental Agriculture*. 2003. Vol. 22. No. 3. P. 215–219.
8. Keisham M., Mukherjee S., Bhatla S.C. Mechanisms of Sodium Transport in Plants-Progresses and Challenges. *International journal of molecular sciences*. 2018. Vol. 19. No. 3. P. 1–22.
9. Gillet C., Lennes G., Bacq Z.M. Action Radioprotectrice de Chlorures Alcalino-terreux (BeCl_2 , SrCl_2 et BaCl_2) Sur La Croissance de L'orge. *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*. 1963. Vol. 7. No. 4. P. 395–399.
10. Conger B.V. Radioprotective effects of ascorbic acid in barley seeds. *Radiation Botany*. 1975. Vol. 15. No. 1. P. 39–48.
11. Biswas S., Matsuo T. Protective and recovery effects of chemicals on plant growth, chromosome aberration and mutation in irradiated seed of crop plants. *Radiation Botany*. 1966. Vol. 6. No. 6. P. 575–587.
12. Božič M., Kokol V. Ecological alternatives to the reduction and oxidation processes in dyeing with vat and sulphur dyes. *Dyes and Pigments*. 2008. Vol. 76. No. 2. P. 299–309.
13. Bhatia C.R. Modification of X-ray sensitivity by metal ions in *Crotalaria intermedia* seeds. *Radiation Botany*. 1967. Vol. 7. No. 3. P. 161–165.
14. Hazama Y., Hazama K., Ehrenberg L. The influence of paramagnetic ions on the radiation sensitivity of plant seeds. *Radiation Botany*. 1963. Vol. 3. No. 1. P. 7–18.
15. Stadler L. J. Mutations in barley induced by X-rays and radium. *Science*. 1928. Vol. 68. No. 1756. P. 186–187.
16. Jahan R., Malik S., Ansari S., Khan S. Evaluation of Optimal Doses for Gamma Rays and Sodium Azide in Linseed Genotypes. *Agricultural Science Digest*. 2020. Vol. 41. P. 207–210.
17. Yafizham, Herwibawa B. The effects of sodium azide on seed germination and seedling growth of chili pepper (*Capsicum annum* L. cv. Landung). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 102. No. 1. P. 12052.
18. Gruszka D., Szarejko I., Maluszynski M. *Plant Mutation Breeding and Biotechnology*. London: CABI, 2012. 608 p.
19. Hossein pour A., Tosun M., Haliloglu K. Mutagenic effects of sodium azide on in vitro mutagenesis, polymorphism and genomic instability in wheat (*Triticum*

Сіненко Б. В.

aestivum L.). *Molecular Biology Reports*. 2022. Vol. 49. No. 7. P. 10165–10174.

20. Kleinhofs A., Kleinschmidt M., Sciaky D., Von Broembsen S. Azide mutagenesis. In vitro studies. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*. 1975. Vol. 29. No. 3. P. 497–499.

21. Khan S., Al-Qurainy F., Anwar F. Sodium Azide: a Chemical Mutagen for Enhancement of Agronomic Traits of Crop Plants. *Environment & We an International Journal of Science & Technology*. 2009. Vol. 4. No. 1. P. 1–21.

22. Conger B.V. The effects of ascorbic acid and sodium azide on seedling growth of irradiated and non-irradiated barley seeds. *Radiation Botany*. 1973. Vol. 13. No. 6. P. 375–379.

23. Chen X., Zhang R., Xing Y., Jiang B., Li B., Xu X., Zhou Y. The efficacy of different seed priming agents for promoting sorghum germination under salt stress. *PLoS ONE*. 2021. Vol. 16. No. 1. P. 1–14.

24. Held K.D., Powers E.L. Sensitization to X-rays of transforming DNA by Ag⁺. *International journal of radiation biology and related studies in physics, chemistry, and medicine*. 1980. Vol. 38. No. 3. P. 293–307.

25. Szumiel I. Requirements for Potentiation of Radiation Effect by a Platinum Complex. *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*. 1978. Vol. 33. No. 6. P. 605–608.

26. Bali R., Siegele R., Harris A.T. Biogenic Pt uptake and nanoparticle formation in *Medicago sativa* and *Brassica juncea*. *Journal of Nanoparticle Research*. 2010. Vol. 12. No. 8. C. 3087–3095.

27. Song J.Y., Kwon E.-Y., Kim B.S. Biological synthesis of platinum nanoparticles using *Diopyros kaki* leaf extract. *Bioprocess and biosystems engineering*. 2010. Vol. 33. No. 1. P. 159–164.

28. Asztemborska M., Steborowski R., Kowalska J., Bystrzejewska-Piotrowska G. Accumulation of Platinum Nanoparticles by *Sinapis alba* and *Lepidium sativum* Plants. *Water, air, and soil pollution*. 2015. Vol. 226. No. 4. P. 1–7.

29. Hullo M., Grall R., Perrot Y., Mathé C., Ménard V., Yang X., Lacombe S., Porcel E., Villagrasa C., Chevillard S., Bourneuf E. Radiation Enhancer Effect of Platinum Nanoparticles in Breast Cancer Cell Lines: In Vitro and In Silico Analyses. *International journal of molecular sciences*. 2021. Vol. 22. No. 9. P. 1–18.

References

1. Asztemborska, M., Steborowski, R., Kowalska, J., & Bystrzejewska-Piotrowska, G. (2015). Accumulation of Platinum Nanoparticles by *Sinapis alba* and *Lepidium sativum* Plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 226(4), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2381-y>

2. Baek, M.-H., Lee, Y.-K., Lee, Y.-B., Yang, S.-G., & Kim, J.-S. (2003). Effects of Low Dose Gamma Radiation and Seed Moisture Content on Germination and Early Growth of Vegetable Crops. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 22(3), 215–219. <https://doi.org/10.5338/kjea.2003.22.3.215>

3. Bali, R., Siegele, R., & Harris, A. T. (2010). Biogenic Pt uptake and nanoparticle formation in *Medicago sativa* and *Brassica juncea*. *Journal of Nanoparticle Research*, 12(8), 3087–3095. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-9904-7>

4. Bhatia, C. R. (1967). Modification of X-ray sensitivity by metal ions in *Crotalaria intermedia* seeds. *Radiation Botany*, 7(3), 161–165. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0033-7560\(67\)80015-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0033-7560(67)80015-2)

5. Biswas, S., & Matsuo, T. (1966). Protective and recovery effects of chemicals on plant growth, chromosome aberration and mutation in irradiated seed of crop plants. *Radiation Botany*, 6(6), 575–587. [https://doi.org/10.1016/S0033-7560\(66\)80106-0](https://doi.org/10.1016/S0033-7560(66)80106-0)

6. Božič, M., & Kokol, V. (2008). Ecological alternatives to the reduction and oxidation processes in dyeing with vat and sulphur dyes. *Dyes and Pigments*, 76(2), 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.05.041>

7. Chen, X., Zhang, R., Xing, Y., Jiang, B., Li, B., Xu, X., & Zhou, Y. (2021). The efficacy of different seed priming agents for promoting sorghum germination under salt

Сіненко Б. В.

stress. *PLoS ONE*, 16(1 January), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245505>

8. Conger, B. V. (1975). Radioprotective effects of ascorbic acid in barley seeds. *Radiation Botany*, 15(1), 39–48. [https://doi.org/10.1016/s0033-7560\(75\)80013-5](https://doi.org/10.1016/s0033-7560(75)80013-5)

9. Conger, B. V. (1973). The effects of ascorbic acid and sodium azide on seedling growth of irradiated and non-irradiated barley seeds. *Radiation Botany*, 13(6), 375–379. [https://doi.org/10.1016/S0033-7560\(73\)90176-2](https://doi.org/10.1016/S0033-7560(73)90176-2)

10. Duarte, G. T., Volkova, P. Y., Fiengo Perez, F., & Horemans, N. (2023). Chronic Ionizing Radiation of Plants: An Evolutionary Factor from Direct Damage to Non-Target Effects. *Plants*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/plants12051178>

11. Georgieva, M., & Vassileva, V. (2023). Stress Management in Plants: Examining Provisional and Unique Dose-Dependent Responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5105), 1–25.

12. Gillet, C., Lennes, G., & Bacq, Z. M. (1963). Action Radioprotectrice de Chlorures Alcalino-terreux (BeCl₂, SrCl₂ et BaCl₂) Sur La Croissance de L'orge. *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*, 7(4), 395–399.

<https://doi.org/10.1080/09553006314551331>

13. Gruszka, D., Szarejko, I., & Maluszynski, M. (2012). Sodium Azide as a Mutagen. In Q. Y. Shu, B. P. Forster, & H. Nakagawa (Eds.), *Plant Mutation Breeding and Biotechnology* (pp. 159–166). CABI. <https://doi.org/10.13140/2.1.2105.8560>

14. Gudkov, S. V., Grinberg, M. A., Sukhov, V., & Vodeneev, V. (2019). Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 202, 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.02.001>

15. Hazama, Y., Hazama, K., & Ehrenberg, L. (1963). The influence of paramagnetic ions on the radiation sensitivity of plant seeds. *Radiation Botany*, 3(1), 7–18. [https://doi.org/10.1016/0033-7560\(63\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0033-7560(63)90003-6)

16. Held, K. D., & Powers, E. L. (1980). Sensitization to X-rays of transforming DNA by Ag⁺. *International Journal of Radiation*

Biology and Related Studies in Physics, Chemistry, and Medicine, 38(3), 293–307. <https://doi.org/10.1080/09553008014551661>

17. Hossein pour, A., Tosun, M., & Haliloglu, K. (2022). Mutagenic effects of sodium azide on in vitro mutagenesis, polymorphism and genomic instability in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Molecular Biology Reports*, 49(7), 10165–10174. <https://doi.org/10.1007/s11033-022-07896-y>

18. Hullo, M., Grall, R., Perrot, Y., Mathé, C., Ménard, V., Yang, X., Lacombe, S., Porcel, E., Villagrasa, C., Chevillard, S., & Bourneuf, E. (2021). Radiation Enhancer Effect of Platinum Nanoparticles in Breast Cancer Cell Lines: In Vitro and In Silico Analyses. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/ijms22094436>

19. Jahan, R., Malik, S., Ansari, S., & Khan, S. (2020). Evaluation of Optimal Doses for Gamma Rays and Sodium Azide in Linseed Genotypes. *Agricultural Science Digest*, 41, 207–210. <https://doi.org/10.18805/ag.D-5165>

20. Keisham, M., Mukherjee, S., & Bhatla, S. C. (2018). Mechanisms of Sodium Transport in Plants-Progresses and Challenges. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/ijms19030647>

21. Khan, S., Al-Qurainy, F., & Anwar, F. (2009). Sodium Azide: a Chemical Mutagen for Enhancement of Agronomic Traits of Crop Plants. *Environment & We an International Journal of Science & Technology*, 4(1), 1–21.

22. Kleinhofs, A., Kleinschmidt, M., Sciaky, D., & Von Broembsen, S. (1975). Azide mutagenesis. In vitro studies. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 29(3), 497–499. [https://doi.org/10.1016/0027-5107\(75\)90069-X](https://doi.org/10.1016/0027-5107(75)90069-X)

23. Lunec, J., & Parker, R. (1980). The Influence of pH on the Enhancement of Radiation Damage by Hyperthermia. *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*, 38(5), 567–574. <https://doi.org/10.1080/09553008014551381>

24. Osterrieth, P. M. (1963). Induction par les Rayons X de la Destruction de L'acide Désoxyribonucléique d'Escherichia Freundii Induction par les Rayons X de la Destruction de

Сіненко Б. В.

L'acide Désoxyribonucléique d'Escherichia Freundii. *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*, 6(3), 289–296. <https://doi.org/10.1080/09553006314550361>

25. Sideris, E. G., Nilan, R. A., & Bogyo, T. P. (1973). Differential effect of sodium azide on the frequency of radiation-induced chromosome aberrations vs. the frequency of radiation-induced chlorophyll mutations in *Hordeum vulgare*. *Radiation Botany*, 13(6), 315–322. [https://doi.org/10.1016/s0033-7560\(73\)90057-4](https://doi.org/10.1016/s0033-7560(73)90057-4)

26. Song, J. Y., Kwon, E.-Y., & Kim, B. S. (2010). Biological synthesis of platinum nanoparticles using *Diopyros kaki* leaf extract. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 33(1), 159–164. <https://doi.org/10.1007/s00449-009-0373-2>

27. Stadler, L. J. (1928). Mutations in barley induced by X-rays and radium. *Science*, 68(1756), 186–187. <https://doi.org/10.1126/science.68.1756.186>

28. Szumiel, I. (1978). Requirements for Potentiation of Radiation Effect by a Platinum Complex. *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*, 33(6), 605–608. <https://doi.org/10.1080/09553007814550531>

29. Yafizham, & Herwibawa, B. (2018). The effects of sodium azide on seed germination and seedling growth of chili pepper (*Capsicum annum* L. cv. Landung). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 102(1), 12052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/102/1/012052>

EFFECT OF INORGANIC CHEMICALS ON RADIORESISTANCE OF SEEDS

B. Sinenko

Abstract. Ionic inorganic compounds can affect the radioresistance of plant. There are many studies describing the effects of certain compounds and trying to explain the mechanism of their action. However, a review of modern research showed a need for a comprehensive analysis of concentrations and effects of ionic compounds on plant seeds. In this regard, our study aimed to condense and structure this material for better understanding. The result of the work was a table of the effects of the interactions of cations and anions during the seeds treatment before irradiation with X-ray and γ -radiation. Also, the main regularities in the behavior of ionic salts were briefly outlined with examples of their application. Thus, halides of alkali and alkaline earth metals have a solid radioprotective effect. The effect of sulfates and divalent metals depends on their concentration and interaction with cellular structures. Nitrates of heavy metals and azides negatively affected the radioresistance of plant seeds. The effect of cations depends mainly on chemical and physiological properties. At the same time, metal complexes with a high proton number can act as sensitizers due to the physical effects of the products of the physiological metabolism of plants. Based on the analyzed data, it can be concluded that the influence of simple inorganic salts requires additional attention and in-depth research. In the future, studying the effect of their application can help in understanding the general rules of the radioprotection of plants. And also in the fundamental understanding of the relationship between the soil solution of salts on saline soils and its effect on the radioresistance of plants in the early stages of development.

Keywords: seeds, plants, inorganic substances, ions, X-ray, γ -radiation