

АНАЛІЗ АКТИВНОСТІ ЕНЗИМНИХ МАРКЕРІВ ГЕПАТОТОКСИЧНОСТІ ЗА УМОВ МОДЕЛЬНОГО ВПЛИВУ ГЛІФОСАТУ ТА ІМІДАЗОЛІНОНІВ НА *CARASSIUS GIBELIO*

Л.В. ХУДА, О.І. ХУДИЙ

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,

вул. Коцюбинського 2, м. Чернівці, 58012

e-mail: l.khuda@chnu.edu.ua

o.khudyi@chnu.edu.ua

У статті представлено результати порівняльного аналізу активності ензимних маркерів гепатотоксичності у сироватці крові карася сріблястого (*Carassius gibelio*) за умов модельного впливу високих концентрацій поширених гербіцидів — гліфосату (препарат «Ураган Форте 500 SL») та імідазолінонів (препарат «Євролайтинг»). Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оцінки екологічних ризиків в умовах повномасштабних бойових дій в Україні, що можуть призводити до локальних «залпових» викидів агрохімікатів у водойми у концентраціях, що значно перевищують фонові показники.

Експеримент тривалістю 7 діб проводився на особинах *C. gibelio*, які утримувалися у воді з градієнтом концентрацій токсикантів від 1 до 10 ГДК. Оцінку функціонального стану печінки здійснювали за активністю ключових ферментів: аланінамінотрансферази (АЛТ), аспартатамінотрансферази (АСТ), лужної фосфатази (ЛФ) та гамма-глутамілтрансферази (ГГТ). Встановлено, що обидва класи сполук викликають виражений метаболічний дисбаланс, ініціюючи каскад патологічних реакцій. Дослідження виявило чітку дозозалежну реакцію: максимальна активність ензимів фіксувалася при експозиції 10 ГДК. При цьому виявлено суттєві відмінності у порогах токсичної дії: для гліфосату значне підвищення активності АЛТ спостерігалось вже при 1 ГДК, тоді як для імідазолінонів аналогічний рівень цитолізу реєструвався лише при 5 ГДК.

Результати свідчать про різну спрямованість токсичної дії препаратів. Вплив імідазолінонів має переважно гепатотропний характер, що підтверджується зростанням АЛТ та зниженням коефіцієнта де Рітиса. Натомість гліфосат виявляє ознаки системної цитотоксичності, спричиняючи глибоке ураження не лише гепатоцитів, а, ймовірно, й міоцитів, про що свідчить екстремальне підвищення АСТ. Поєднання високої активності ЛФ та ГГТ при концентраціях 5–10 ГДК вказує на розвиток синдрому холестазу та глибоку мембранну дисфункцію клітин жовчних проток.

Зроблено висновок щодо принципової різниці в спрямованості токсичної дії досліджуваних сполук: якщо імідазолінони мають виражену гепатотоксичну дію з локалізацією патологічних процесів переважно в паренхімі печінки, то гліфосат виявляє агресивнішим токсикантом для гідробіонтів та виявляє властивості системного цитотоксиканту для організму риб. Отримані дані є критично важливими для моделювання сценаріїв аварійного забруднення водойм та розробки стратегій збереження їх біорізноманіття.

Ключові слова: гліфосат, імідазолінони, амінотрансферази, лужна фосфатаза, гамма-глутамілтрансфераза, риби

Вступ. Традиційно токсикологічні дослідження зосереджуються на впливі залишкових кількостей пестицидів. Проте сучасні реалії України вимагають перегляду підходів до оцінки екологічних ризиків. В умовах повномасштабних бойових дій виникла безпрецедентна загроза неконтрольованого масового потрапляння агрохімікатів у навколишнє середовище, зокрема у водойми (Solokha et al., 2024; Shumilova et al., 2023). Вибухи на сільськогосподарських угіддях, пошкодження ґрунтового покриву, руйнування водозахисних споруд та порушення гідрологічного режиму можуть призводити до локальних «залпових» викидів забруднювачів. Це зумовлює необхідність вивчення впливу

концентрацій токсикантів, що значно перевищують звичні фонові показники.

Дослідження зосереджено на гліфосаті та імідазолінонах, що зумовлено їхнім домінуючим становищем у структурі гербіцидного навантаження агроценозів України (обробка зернових та посівів сояшнику). Незважаючи на відмінності у молекулярних механізмах фітотоксичності (інгібування шикиматного шляху гліфосатом проти блокування ацетолактатсинтази імідазолінонами), їх об'єднує спільна фізико-хімічна характеристика: висока водорозчинність. Ця властивість, у поєднанні зі здатністю до тривалої міграції у ґрунтовому профілі, створює значні токсикологічні ризики для водних екосистем (Klátyik et al., 2024).

Для гідробіонтів обидва класи сполук становлять загрозу як агенти неспецифічної токсичної дії. Потрапляючи в організм риб, ці ксенобіотики ініціюють каскад універсальних патологічних реакцій: індукцію вільнорадикальних процесів та виснаження детоксикаційних резервів печінки (Golombieski et al., 2022; Jin et al., 2018). Таким чином, порівняльний аналіз їхнього впливу дозволяє виявити загальні закономірності гепатотоксичності сучасних агрохімікатів в умовах аварійного забруднення водойм.

У даній роботі модельним об'єктом обрано карася сріблястого (*Carassius gibelio*, Bloch, 1782) - типового представника іхтіофауни водойм агроландшафтів, що характеризується високою резистентністю до токсичного навантаження. Це необхідно для коректного моделювання сценаріїв «залпового» забруднення водойм (до 10 ГДК), оскільки дозволяє відслідкувати динаміку біохімічних порушень та адаптаційних механізмів *in vivo* до настання незворотних патологічних змін або загибелі організму.

Отже, метою даного дослідження було проведення порівняльного аналізу змін активності ензимних маркерів гепатотоксичності у сироватці крові *C. gibelio* за умов дії гліфосату та імідазолінонів у діапазоні концентрацій 1–10 ГДК, що моделює сценарії аварійного забруднення водойм гербіцидами.

Матеріали та методи. Як модельні токсиканти використано комерційні препарати: «Ураган Форте 500 SL» (діюча речовина — гліфосат) та «Євролайтинг» (діючі речовини — імазамокс, імазапір) від компанії Syngenta. Схема досліду передбачала створення градієнта концентрацій, кратних гранично допустимим (ГДК), згідно з ДСанПіН 8.8.1.2.3.4-000-2001. Для гліфосату досліджували концентрації становили: 1 ГДК (0.02×10^{-3} г/л), 2 ГДК (0.04×10^{-3} г/л), 5 ГДК (0.1×10^{-3} г/л) та 10 ГДК (0.2×10^{-3} г/л). Розрахунок доз для препарату «Євролайтинг» здійснювали на підставі гранично допустимої концентрації у воді для імазамоксу ($0,06 \times 10^{-3}$ г/л).

У дослідженні використовували особин *Carassius gibelio* (середня маса 180 ± 10 г), яких утримували у скляних акваріумах об'ємом 30 л в умовах фіксованого температурного режиму (21 ± 1 °C), фотоперіоду (16-годинний світловий день), постійної аерації. Щоденний моніторинг охоплював вимірювання фізико-хімічних параметрів води та візуальну оцінку поведінкових реакцій гідробіонтів.

Експеримент проводили у напівстатичному режимі. Для підтримки стабільної концентрації ксенобіотиків щоденно здійснювали часткову заміну води на свіжу з додаванням відповідної кількості гербіциду. Контрольна група утримувалася у чистій воді без додавання токсикантів. Тривалість експозиції становила 7 діб. По завершенні досліду риб піддавали евтаназії з використанням спеціалізованого анестетика «Propiscin» (0,2%, IRS-ZPiR, Польща). Відбір крові проводили шляхом кардіальної пункції. Матеріалом для біохімічного аналізу слугувала сироватка крові. Визначали активність аланінамінотрансферази (АЛТ, ЕС 2.6.1.2), аспартатамінотрансферази (АСТ, ЕС 2.6.1.1), лужної фосфатази (ЛФ, ЕС 3.1.3.1.) та гамма-глутамілтрансферази (ГГТ, ЕС 2.3.2.2). Дослідження проводили на біохімічному аналізаторі Biochem FC-120 (High Technology Inc., North Attleboro, MA, USA).

Статистичну обробку даних здійснювали методом дисперсійного аналізу (ANOVA) при критичному рівні значущості $p \leq 0,05$. Для виявлення парних відмінностей між групами за наявності статистично достовірних відмінностей додатково застосовували критерій Tukey's HSD.

Результати та їх обговорення. Водорозчинні гербіциди, потрапляючи у водне середовище у високих концентраціях, можуть проявляти різноплановий вплив на гідробіонтів. Як відомо, первинний механізм дії гліфосату полягає у блокуванні 5-енолпірувілшикімат-3-фосфатсинтази та порушенні синтезу ароматичних амінокислот у рослин (Rivas-Garcia et al., 2022). Щодо імідазолінонів, то механізм дії імазамоксу та імазапіру полягає у селективному інгібуванні ацетолактатсинтази – ключового ензиму першого етапу біосинтезу незамінних розгалужених амінокислот у рослин (Duggleby et al., 2008). Хоча специфічні рослинні ензими-мішені гліфосату та імідазолінонів відсутні у тварин, ці гербіциди здатні втручатися у фундаментальні біохімічні процеси гідробіонтів через альтернативні шляхи та проявляти виражену нецільову токсичність. Основними механізмами патогенезу є індукція оксидативного стресу, пошкодження клітинних мембран та глибокі метаболічні порушення, які призводять до виснаження адаптаційного потенціалу організмів (Ma et al., 2019; Weeks Santos et al., 2019).

Центральним органом детоксикації ксенобіотиків у риб виступає печінка (гепатопанкреас), а найбільш інформативним методом оцінки її функціонального стану *in vivo* є біохімічний аналіз сироватки крові. Реєстрація

у кров'яному руслі високих активностей внутрішньоклітинних маркерних ферментів є прямим доказом цитолізу та порушення бар'єрних функцій.

У метаболізмі риб, що характеризується інтенсивним використанням білків як енергетичного субстрату, амінотрансферази (АЛТ і АСТ) відіграють центральну роль у процесах переамінування. Оскільки градієнт концентрації цих ензимів між тканиною печінки та кров'ю є дуже високим, навіть незначне порушення проникності клітинних мембран гепатоцитів під дією токсикантів призводить до

їх масового виходу в судинне русло. Саме тому підвищення активності трансаміназ у сироватці крові розглядається як «золотий стандарт» діагностики синдрому цитолізу та гепатотоксичності (Bojarski et al., 2025).

Аналіз активності аланінамінотрансферази у сироватці крові карася сріблястого продемонстрував виражену односпрямовану дозозалежну реакцію організму на вплив досліджуваних гербіцидів. Максимальна активність ензиму фіксувалася при експозиції найвищої концентрації — 10 ГДК (рис. 1.).

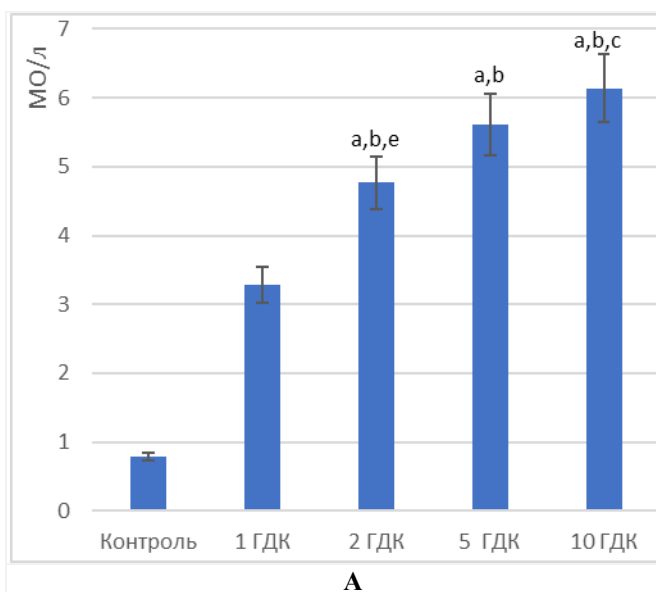


Рис.1 Аланінамінотрансферазна активність сироватки крові *Carassius gibelio* при 7-денній експозиції у воді з різними концентраціями гліфосату (А) та імідазоліонів (В)

Примітка (тут і надалі): а - достовірна різниця з контролем; b - достовірна різниця з групою 1 ГДК; c - достовірна різниця з групою 2 ГДК; d - достовірна різниця з групою 3 ГДК; e - достовірна різниця з групою 4 ГДК. ($p \leq 0,05$)

Слід відзначити суттєвий розрив у порогах токсичної дії порівнюваних препаратів: якщо для гліфосату чотирикратне перевищення контрольних показників відбувалося вже за дії 1 ГДК, то для імідазоліонів подібний рівень цитолізу було зафіксовано лише при збільшенні дози до 5 ГДК.

Результати дослідження активності аспартатамінотрансферази підтвердили різницю токсичності цих гербіцидів для гідробіонтів (рис.2). Інтерпретуючи підвищення активності аспартатамінотрансферази, варто враховувати метаболічні особливості риб як аммоніотелічних організмів, у яких процеси переамінування відіграють провідну роль у забезпеченні глюконеогенезу (Falco et al., 2020). На відміну від АЛТ, яка вважається більш

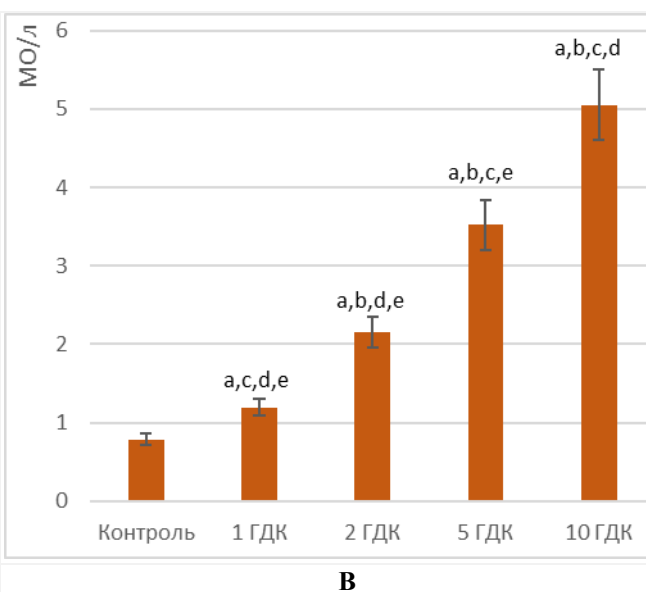


Fig. 1 Alanine aminotransferase activity in *Carassius gibelio* blood serum after 7 days of exposure to water containing different concentrations of glyphosate (A) and imidazolinones (B)

Note (hereinafter): a - significant difference from the control; b - significant difference from group 1 MPC; c - significant difference from group 2 MPC; d - significant difference from group 3 MPC; e - significant difference from group 4 MPC. ($p \leq 0.05$)

гепатоспецифічним маркером, АСТ у риб має ширший тканинний розподіл, локалізуючись у значних кількостях також у скелетних м'язах, нирках та зябрах (Gupta et al., 2023). Тому зростання активності аспартатамінотрансферази у сироватці крові за дії гліфосату та імідазоліонів відображає системну токсичну дію препаратів, що охоплює не лише гепатопанкреас, а й інші життєво важливі органи.

Окрім того, враховуючи наявність мітохондріального ізоферменту АСТ, значний вихід цього ензиму в кров'яне русло при високих концентраціях токсикантів (5–10 ГДК) може свідчити про глибоке ураження клітинних структур, зокрема порушення цілісності мітохондрій та розвиток некротичних процесів у паренхіматозних тканинах.

Порівняльний аналіз біохімічних маркерів при концентрації 10 ГДК дозволяє диференціювати характер токсичності досліджуваних гербіцидів. Вплив імідазолінонів має переважно гепатотропний характер, що

підтверджується домінуючим зростанням АЛТ (у 6 разів) та зниженням коефіцієнта де Рітиса, що вказує на вибіркове ураження паренхіми печінки.

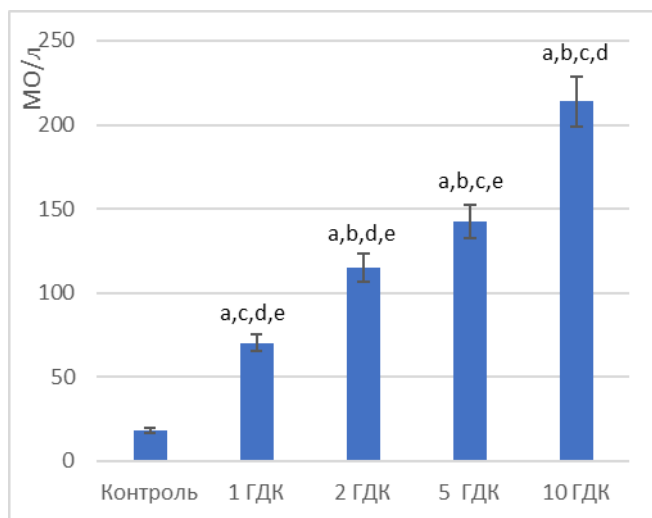


Рис.2 Аспаратамінотрансферазна активність сироватки крові *Carassius gibelio* при 7-денній експозиції у воді з різними концентраціями гліфосату (А) та імідазолінонів (В)

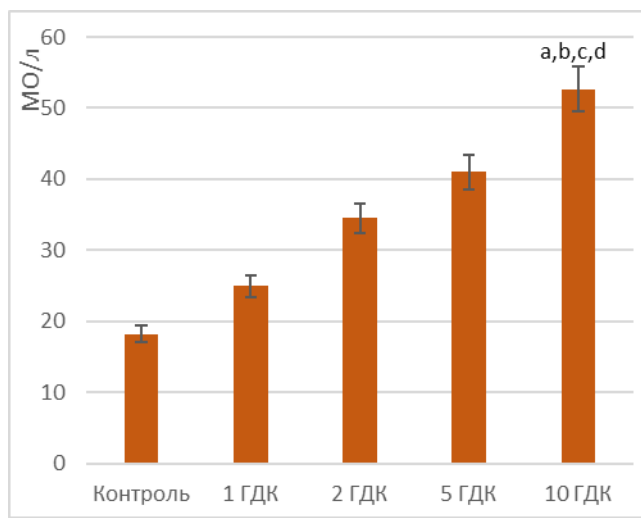


Fig. 2 Aspartate aminotransferase activity in *Carassius gibelio* blood serum after 7 days of exposure to water containing different concentrations of glyphosate (A) and imidazolinones (B)

Натомість гліфосат виявляє ознаки системної цитотоксичності. Попри аналогічний рівень зростання АЛТ (у 6 разів), екстремальне підвищення активності АСТ та двократне зростання коефіцієнта де Рітиса щодо контролю свідчать про глибоке ураження не лише гепатоцитів, а, ймовірно, й міоцитів.

Таким чином, за однакової концентрації (10 ГДК), гліфосат є біохімічно агресивнішим токсикантом для карася сріблястого, оскільки спричиняє незворотний системний некроз, тоді як дія імідазолінонів залишається обмеженою переважно межами гепатобіліарної системи

Ще одним свідченням дії досліджуваних гербіцидів як ксенобіотиків, що уражують клітинні мембрани, є результати визначення активності лужної фосфатази та ГГТ.

Загалом, активність лужної фосфатази через високу метаболічну активність у риб значно вища, ніж у ссавців (Lallès, 2019). Навпаки, активність ГГТ порівняно незначна через фізіологічно нижчу концентрацію у печінці (Jovićić et al., 2025).

Встановлено, що за дії гліфосату різке зростання активності лужної фосфатази відбувалося лише при дії максимальної дози в 10 ГДК – рівень зростав у 2,7 рази (рис. 3А). Натомість, за менших доз гербіциду рівень активності практично не відрізнявся від контрольних значень).

За дії імідазолінонів активність ЛФ поступово підвищувалася пропорційно їх концентрації з досягненням максимального значення при 10 ГДК (рис. 3В).

Подібні ж тенденції реєструвались і при дослідженні ГГТ (рис. 4). Активність ГГТ збільшувалась більш помітно за високих концентрацій гербіцидів (5 та 10 ГДК).

Поєднання підвищеної активності ЛФ та ГГТ при високих концентраціях токсикантів формує класичний синдром холестазу, що вказує на ураження не лише паренхіми печінки, а й її гепатобіліарної ланки. Зростання ЛФ (особливо стрибкоподібне при 10 ГДК гліфосату) свідчить про глибоку мембранну дисфункцію та структурну деградацію клітин жовчних проток.

Паралельне підвищення активності ГГТ має подвійне біохімічне значення: з одного боку, воно підтверджує холестатичний характер ураження, а з іншого — відображає активізацію гамма-глутамільного циклу, що може бути спробою клітин компенсувати гострий дефіцит внутрішньоклітинного глутатіону та протидіяти окиснювальному стресу, спричиненому ксенобіотиками (Zhang et al., 2009). Таким чином, біохімічні дані однозначно вказують на критичну дестабілізацію клітинних мембран та органел під дією високих концентрацій досліджуваних ксенобіотиків, що є чітким

маркером гострої токсичності на клітинному рівні.

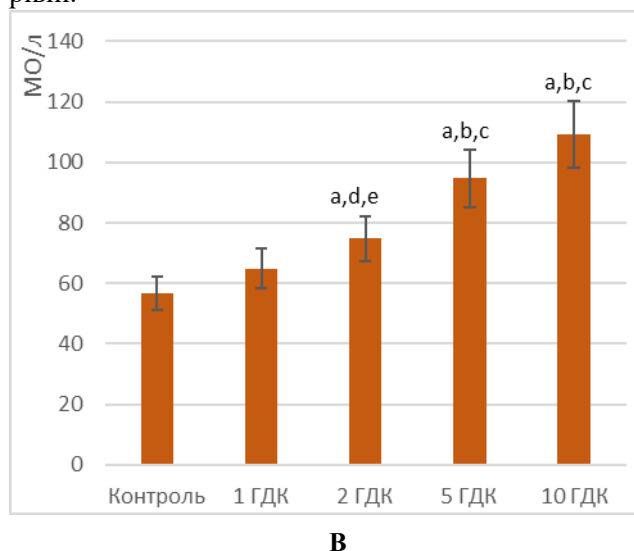
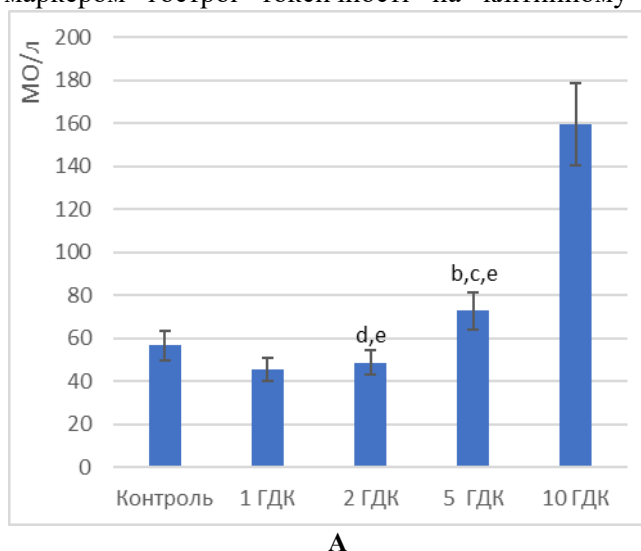


Рис. 3. Активність лужної фосфатази сироватки крові *Carassius gibelio* при 7-денній експозиції у воді з різними концентраціями гліфосату (А) та імідазолінонів (В)

Fig. 3. Alkaline phosphatase activity in *Carassius gibelio* blood serum after 7 days of exposure to water containing different concentrations of glyphosate (A) and imidazolinones (B)

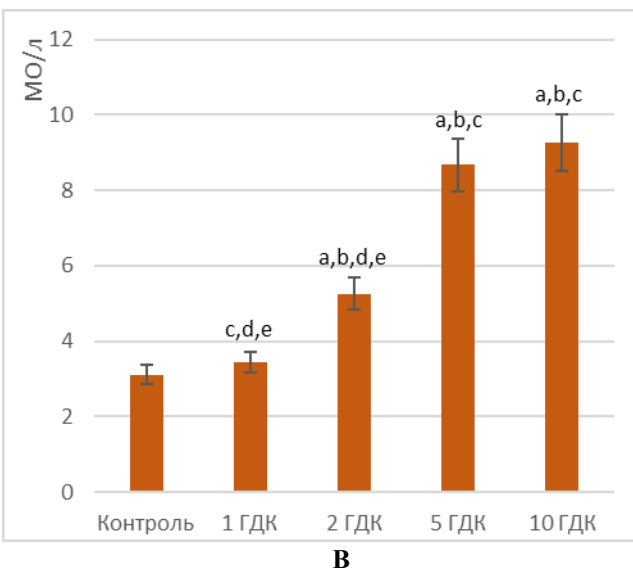
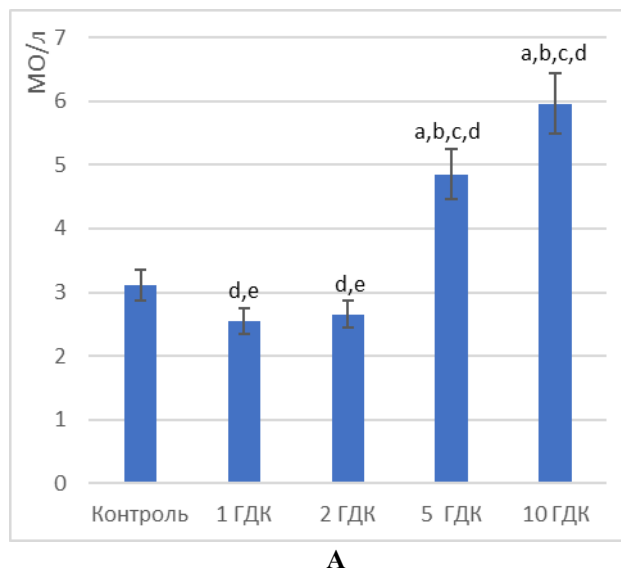


Рис.4 Активність гамма-глутамілтрансферази сироватки крові *Carassius gibelio* при 7-денній експозиції у воді з різними концентраціями гліфосату (А) та імідазолінонів (В)

Fig. 4 Gamma-glutamyltransferase activity in *Carassius gibelio* blood serum after 7 days of exposure to water containing different concentrations of glyphosate (A) and imidazolinones (B)

Висновки. Результати проведеного дослідження свідчать про виражений метаболічний дисбаланс, що проявляється через розвиток цитолітичного та холестатичного синдромів під впливом високих концентрацій гербіцидів. Встановлено принципову різницю в спрямованості токсичної дії досліджуваних сполук: якщо імідазолінони мають виражену гепатотоксичну дію з локалізацією патологічних процесів переважно в паренхімі печінки, то

гліфосат виявляє властивості системного цитотоксиканту для організму риб.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють, що дослідження проводилося за відсутності будь-яких комерційних або фінансових відносин, які можна було б витлумачити як потенційний конфлікт інтересів.

Фінансування: Дослідження проведено за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України (грант № 0125U001564).

Список літератури / References:

- Bojarski, B., Witeska, M., & Kondera, E. (2025). Blood Biochemical Biomarkers in Fish Toxicology - A Review. *Animals*, 15(7), 965. <https://doi.org/10.3390/ani15070965>
- Duggleby, R. G., McCourt, J. A., & Guddat, L. W. (2008). Structure and mechanism of inhibition of plant acetohydroxyacid synthase. *Plant Physiology and Biochemistry*, 46(3), 309–324. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.12.004>
- Falco F., Stincone P., Cammarata M., Brandelli A. (2020) Amino Acids as the Main Energy Source in Fish Tissues. *Aquac Fish Stud*, 3(1), 1–11. <https://doi.org/10.31038/AFS.2020223>
- Golombieski, J.I., Sutli, F.J., Salbego, J. et al. (2016). Imazapyr + imazapic herbicide determines acute toxicity in silver catfish *Rhamdia quelen*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.02.010>
- Gupta, A., Sharma, B. (2023). A study on transaminases in lindane exposed fish *C. punctatus*. *Journal of Biomedical Research & Environmental Sciences*, 4(6), 1100–1107. <https://doi.org/10.37871/jbres1773>
- Jin J, Kurobe T, Ramírez-Duarte WF, Bolotaolo MB, Lam CH, Pandey PK, Hung TC, Stillway ME, Zweig L, Caudill J, Lin L, Teh SJ. (2018) Sub-lethal effects of herbicides penoxsulam, imazamox, fluridone and glyphosate on Delta Smelt (*Hypomesus transpacificus*). *Aquat Toxicol*, Apr;197, 79–88 <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2018.01.019>
- Jovičić, K., Đikanović, V., Subotić, S., Dimitrijević, M., Kovačević, S., Miljanović, B., & Vranković, J. S. (2025). Assessment of Hepatic Enzyme Biomarkers in Northern Pike (*Esox lucius*) from Lotic and Lentic Freshwater Habitats: Implications for Monitoring Metal Pollution and Ecological Stress in Aquatic Ecosystems. *Fishes*, 10(11), 541. <https://doi.org/10.3390/fishes10110541>
- Klátyik, S., Simon, G., Oláh, M., Takács, E., Mesnage, R., Antoniou, M. N., & Zaller, J. G. (2024) Aquatic ecotoxicity of glyphosate, its formulations, and co-formulants: evidence from 2010 to 2023. *Environmental Sciences Europe*, 36, Article 22. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00849-1>
- Lallès, J. P. (2019). Biology, environmental and nutritional modulation of skin mucus alkaline phosphatase in fish: A review. *Fish & Shellfish Immunology*, 89, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.03.053>
- Ma, J., Zhu, J., Wang, W., Ruan, P., Rajeshkumar, S., & Li, X. (2019). Biochemical and molecular impacts of glyphosate-based herbicide on the gills of common carp (*Cyprinus carpio*). *Environmental Pollution*, 252, 1288–1300. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.040>
- Rivas-Garcia, T., Espinosa-Calderón, A., Hernández-Vázquez, B., Schwentesius-Rindermann, R. (2022) Overview of Environmental and Health Effects Related to Glyphosate Usage *Sustainability*, 14, 6868 <https://doi.org/10.3390/su14116868>
- Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., & others. (2023). Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*, 6, 578–586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>
- Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., & Sementsova, K. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>
- Weeks Santos S., Gonzalez P., Cormier B., Mazzella N., Bonnaud B., Morin S., Clérandeau C., Morin B., Cachot J. A (2019) Glyphosate-based herbicide induces sub-lethal effects in early life stages and liver cell line of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquat Toxicol*, 216.105291. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.10.5291>
- Zhang H, Forman H.J. (2009) Redox regulation of gamma-glutamyl transpeptidase. *Am J Respir Cell Mol Biol*. Nov;41(5), 509–515. <https://doi.org/10.1165/rcmb.2009-0169TR>

ANALYSIS OF ENZYMATIC MARKER ACTIVITY OF HEPATOTOXICITY UNDER MODEL EXPOSURE TO GLYPHOSATE AND IMIDAZOLINONES IN CARASSIUS GIBELIO

Khuda L.V., Khudiyi O.I.

Yuri Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsyubynskoho Street, Chernivtsi, 58012
e-mail: l.khuda@chnu.edu.ua
o.khudiyi@chnu.edu.ua

The article presents the results of a comparative analysis of the activity of enzyme markers of hepatotoxicity in the blood serum of silver crucian carp (*Carassius gibelio*) under conditions of model exposure to high concentrations of common herbicides—glyphosate (the drug “Uragan Forte 500 SL”) and imidazolinones (Eurolighting). The relevance

of the study is due to the need to assess environmental risks in the context of full-scale hostilities in Ukraine, which can lead to local “salvo” emissions of agrochemicals into water bodies in concentrations that significantly exceed background levels.

The experiment lasted 7 days and was conducted on *C. gibelio* specimens kept in water with a concentration gradient of toxicants from 1 to 10 MPC. The functional state of the liver was assessed based on the activity of key enzymes: alanine aminotransferase (ALT), aspartate aminotransferase (AST), alkaline phosphatase (ALP), and gamma-glutamyltransferase (GGT). It was found that both classes of compounds cause a pronounced metabolic imbalance, initiating a cascade of pathological reactions. The study revealed a clear dose-dependent response: maximum enzyme activity was recorded at an exposure of 10 MPC. At the same time, significant differences in the thresholds of toxic action were found: for glyphosate, a significant increase in ALT activity was observed already at 1 MPC, while for imidazolinones, a similar level of cytolysis was recorded only at 5 MPC.

The results indicate different directions of toxic effects of the drugs. The effect of imidazolinones is predominantly hepatotropic, as confirmed by an increase in ALT and a decrease in the de Ritis coefficient. Glyphosate, on the other hand, shows signs of systemic cytotoxicity, causing profound damage not only to hepatocytes but also, presumably, to myocytes, as evidenced by an extreme increase in AST. The combination of high ALP and GGT activity at concentrations of 5–10 MPC indicates the development of cholestasis syndrome and profound membrane dysfunction of bile duct cells.

It was concluded that there is a fundamental difference in the direction of the toxic effects of the studied compounds: while imidazolinones have a pronounced hepatotoxic effect with the localization of pathological processes mainly in the liver parenchyma, glyphosate is a more aggressive toxicant for hydrobionts and exhibits the properties of a systemic cytotoxic agent for fish. The data obtained are critically important for modeling scenarios of accidental pollution of water bodies and developing strategies for preserving their biodiversity.

Keywords: glyphosate, imidazolinones, aminotransferases, alkaline phosphatase, gamma-glutamyltransferase, fish

Отримано редколегією 14.11.2025 р.

ORCID ID

Лідія Худа: <https://orcid.org/0000-0002-1098-7537>

Олексій Худий: <https://orcid.org/0000-0001-5652-0900>