

# ЕКОЛОГІЧНА ФІЗІОЛОГІЯ І БІОХІМІЯ ВОДНИХ ТВАРИН

---

УДК 591.3:597.55.2 (574.2:577.151)

**В.М. МАРЦЕНЮК**, к. б. н., мол. наук. співроб.,  
Інститут гідробіології НАН України,  
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна,  
e-mail: wmarzenuk@gmail.com  
ORCID 0000-0002-9998-0445

**О.С. ПОТРОХОВ**, д. б. н., ст. наук. співроб.,  
Інститут гідробіології НАН України,  
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна,  
e-mail: apotrokhov@gmail.com  
ORCID 0000-0002-8274-6898

## ОСОБЛИВОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТКАНИН ОКУНЯ ТА ПЛІТКИ ЗА НАДМІРНОГО АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

---

Досліджено зміни вмісту та співвідношення аденілатних нуклеотидів (АТФ, АМФ, АДФ) у тканинах окуня та плітки в умовах антропогенного забруднення водойм м. Києва протягом різних сезонів.

Встановлено, що рівновага аденілатного пулу в тканинах риб із забрудненої водойми зміщується переважно в бік підвищення частки низькоенергетичних фосфатів у різні сезони року порівняно з контролем. Встановлено незначну реорганізацію у співвідношенні основних компонентів аденілатного пулу у м'язах плітки. Найбільш чітко ці зміни спостерігаються влітку, а саме: співвідношення АТФ:АДФ:АМФ у м'язах плітки із забрудненого озера становило 53, 29 та 18 % проти 61, 24 та 15 % у контрольному озері. У зябрах окуня з дослідного озера співвідношення аденілатів (АТФ:АДФ:АМФ) у весняний період становило 54:28:18 проти 45:30:25 восени. Очевидно, з весни до осені спостерігається тенденція до зниження частки АТФ та підвищення АМФ. Це є наслідком активного залучення високоенергетичного фосфату у біохімічні реакції, спрямовані на адаптацію, що підтверджує переважання енергозатратних процесів над енергогенеруючими. Не виключено, що за час перебування в подібних умовах у плітки сформувались ефективні адаптивні механізми протидії забрудненому середовищу, які проявляються інакше, ніж в окуня, що також підтверджує наявність міжвидових реакцій у таксономічно та екологічно віддалених між собою видів.

Доведено, що зміни вмісту аденілатів та їхнього співвідношення є потенційними маркерними показниками для діагностики фізіологічного стану представників іхтіофауни водойм міста.

**Ключові слова:** окунь, плітка, енергогенерувальні процеси, аденілові нуклеотиди, антропогенне забруднення, адаптивні реакції.

---

Ц и т у в а н н я: Марценюк В.М., Потрохов О.С. Особливості енергетичного забезпечення тканин окуня та плітки за надмірного антропогенного навантаження. Гідробіол. журн. 2024. Т. 60. № 3. С. 62—75.

Забруднення водного середовища — одна з найбільш глобальних проблем сьогодення. Внаслідок надходження до прісноводних екосистем токсичних сполук відбуваються істотні зміни у структурі гідробіоценозів [10]. Також встановлено, що вплив різноманітних токсикантів на водні екосистеми має комплексний характер, а роль окремих компонентів не завжди можна виділити і оцінити [12]. Окрім цього відомо, що ступінь токсичності для організмів змінюється протягом року залежно від поведінки риб та їхнього фізіологічного стану у різні пори року. Токсичні сполуки, потрапляючи до організму, можуть викликати незворотні зміни, які відбиваються надалі на процесах росту, розвитку і розмноження. Зміна цих показників може відображатись також на структурних показниках популяцій, зокрема на співвідношенні статей, вікових груп тощо [19, 25]. Проблеми адаптації риб приділяється чимало уваги [26]. У свою чергу, дослідження адаптивних механізмів у риб вимагає вивчення більш точних показників для розуміння процесів енергетичного регулювання життєво важливих процесів. До таких показників можна віднести макроергічні сполуки — аденозинтрифосфат, аденозиндіфосфат та аденозинмонофосфат (АТФ, АМФ, АДФ) [14, 20]. З урахуванням суттєвих змін клімату [4, 13] та посилення антропогенного пресингу на водойми міста [10] вивчення сумісної дії на риб температури, мінералізації та забруднення є вкрай важливим.

З огляду на це метою роботи було встановити зміни вмісту макроергічних сполук та біоенергетичних індексів у тканинах окуня та плітки за дії посиленого антропогенного забруднення.

### Матеріал і методика досліджень

*Характеристика районів дослідження.* Дослідження проводили на двох озерах м. Києва (Україна), що характеризуються різним хімічним складом та токсикологічними параметрами. Озеро № 1 (оз. Кирилівське) характеризується значним антропогенним навантаженням. Озеро розташоване в точці з географічними координатами 50°29'51" N 30°29'37" E. Середня глибина озера становить 12 м, максимальна — 15 м, площа — 19,5 га [10]. Озеро використовується як збірник стічних вод автомийок, автозаправних станцій, промислових цехів. Концентрації основних токсикантів та хімічні показники води озера наведено нижче.

Озеро № 2 (оз. Бабине) характеризується незначним антропогенним навантаженням. Водойма розташована за координатами 50°28'09" N 30°32'38" E. Озеро знаходиться на острові посеред р. Дніпро та відокремлене від міської забудови. Площа водного дзеркала озера становить 4,72 га, середня глибина 2 м, максимальна — 5 м [10]. Цей водний об'єкт було обрано як умовний контроль.

*Методи відбору проб.* Відбір матеріалу здійснювали весною (квітень), влітку (липень) та восени (жовтень). Після відбору зразки води фіксували хлороформом. У лабораторних умовах концентрацію розчиненого у воді кисню визначали методом Вінклера [6], водневий показник (рН) оцінювали за допомогою рН-метра РН-009 (1), загальну мінералізацію води —

TDS-метра IDS-2, температуру вимірювали ртутним лабораторним термометром з ціною поділки 0,1°C. Для визначення вмісту металів у воді проби відбирали у пластикові пляшки об'ємом 1 дм<sup>3</sup>. Проби не фіксували. Вміст окремих йонів, токсичних сполук у воді було взято з літературних джерел та даних санепідемстанції. Вміст металів (Zn, Cd, Co, Ni, Cu) у дослідних водоймах вимірювали на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С-115 з використанням відповідних стандартів після концентрування відібраних зразків води шляхом випарювання [11].

Загальна мінералізація води оз. Кирилівського у квітні коливалась у межах 520—640 мг/дм<sup>3</sup>, температура води — 12,5—17,2 °С, вміст розчиненого кисню — 6,5—10,0 мг/дм<sup>3</sup>. У липні мінералізація становила 520—573 мг/дм<sup>3</sup>, температура води коливалась у межах 25,6—28,2 °С, вміст розчиненого кисню — 8,9—16,8 мг/дм<sup>3</sup>. У жовтні температура води в середньому становила 11,3 °С. Згідно даних санепідемстанції та літературних джерел, зазначена водойма підлягає токсичному навантаженню з боку району м. Києва, зокрема міського району Куренівки, через колекторну систему та р. Сирець. Вода, яка надходить у воду озера, містить значні концентрації нафтопродуктів, СПАР, важких металів, інтенсивність забруднення залежить від сезону року, активності промислових цехів [1, 10].

Надходження в оз. Кирилівське значної кількості хлоридів та сульфатів викликає підвищення рівня мінерального забруднення водойми, що створює нетипові умови для існування риб басейну верхнього Дніпра, де середня мінералізація води становить 250—350 мг/дм<sup>3</sup>. Значна концентрація нафтопродуктів в оз. Кирилівському може пояснюватись розташуванням водойми, зокрема близькою відстанню до автозаправних станцій та автошляхів.

Загальна мінералізація води оз. Бабиного у квітні становила 250 мг/дм<sup>3</sup>, температура води коливалась у межах 10—13 °С, концентрація розчиненого кисню становила 8—12 мг/дм<sup>3</sup>, у липні аналогічні показники становили: 281,2 мг/дм<sup>3</sup>, 22,1—24,0 °С і 8—11 мг/дм<sup>3</sup>. У жовтні температура води сягала 10,0—12,0 °С, концентрація розчиненого кисню становила 8,05 мг/дм<sup>3</sup>. Згідно власних досліджень, вміст окремих токсичних сполук становив: Co — 0,59 мкг/дм<sup>3</sup>, Ni — 12, Cu — 8, Zn — 35,1 мкг/дм<sup>3</sup>.

*Особливості відбору проб.* Виллов риб здійснювали ранньою весною, в середині літа та восени дозволеними законодавством знаряддями лову (сачком з розміром вічка 0,5 см та гачковими знаряддями). Об'єктами дослідження були окунь річковий *Perca fluviatilis* L. та плітка звичайна *Rutilus rutilus* L. як види, які є фоновими представниками іхтіофауни на зазначених водоймах. Досліджувані риби мали такі розмірно-масові показники: окунь був масою 28,8±1,2 г, довжиною 13,9±0,7 см; плітка була масою 18,6±0,8 г, довжиною 10,5±0,7 см. Вік досліджуваних особин становив 2 роки.

*Методи біохімічного аналізу.* У риб відбирали зразки тканин зябер, печінки та м'язів, які надалі гомогенізували. Визначення вмісту АТФ,

АДФ та АМФ у тканинах риб проводили методом висхідної одомірної тонкошарової хроматографії на 48 силікагелевих пластинках Sorbfil з використанням системи розчинників: 1,4-діоксан, ізопропанол, аміак, вода у співвідношенні 4:2:1:4 [2]. Наважку кожного органу ( $0,50 \pm 0,05$  г) змішували з рівним об'ємом  $0,6$  Н  $\text{HClO}_4$ . Далі суміш центрифугували при  $4000$  об/хв протягом  $10$  хв і відбирали  $0,5$  мл супернатанту. Останній нейтралізували змішуванням з  $0,06$  мл  $2$  М розчину  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . Прозорий надосадовий розчин наносили в кількості  $0,03$  мл на пластинку для хроматографії. Хроматографію проводили протягом  $60$ — $90$  хв. Плями нуклеотидів визначали під ультрафіолетовим світлом та елюювали їх з пластин  $3$  мл  $0,1$  Н соляної кислоти протягом  $30$  хв. Елюат спектрофотометрували при  $\lambda=260$  нм.

Також розраховували відсоткове співвідношення аденілових нуклеотидів у тканинах риб. Кількість неорганічного фосфору визначали за методом Фіске — Субароу в інкубаційному середовищі такого складу:  $1$  мл  $0,05$ М трис- $\text{HCl}$ -буфера,  $0,2$  мл  $5,0$  мМ АТФ (приготовленого на трис-буфері),  $0,2$  мл суміші солей ( $1$ М  $\text{NaCl}$ ,  $0,2$ М  $\text{KCl}$ ,  $0,05$ М  $\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ),  $0,1$  мл дистильованої води та  $0,2$  мл гомогенату тканини. Час інкубації суміші становив  $60$  хв за температури  $25^\circ\text{C}$ . Для зупинення реакції додавали  $1$  мл  $10$  %-вої ТХОК (трихлороцтової кислоти) та центрифугували при  $3000$  г протягом  $10$  хв. Для визначення вмісту неорганічного фосфату відбирали  $0,1$  мл центрифугату, до нього додавали  $3$  мл етилового спирту ( $96$  %) та  $0,4$  мл молібдату амонію у  $8$ Н сульфатній кислоті. Зразки фотометрували при довжині хвилі  $390$  нм [5, 8].

*Методи статистичного аналізу.* Статистичну обробку даних проводили стандартними методами з використанням програмного пакету Statistica 8.0 (StatSoftInc, США). Усі результати наведені як середнє значення  $\pm$  похибка середнього значення ( $M \pm m$ ). Їхню відповідність та різницю між зразками даних було визначено за допомогою однофакторного аналізу дисперсії ANOVA при рівні значущості  $p \leq 0,05$ .

### Результати досліджень та їх обговорення

Для реалізації різних енергозалежних функцій будь-якому організму необхідно стабілізувати процеси енергетичного обміну як основу їхньої життєдіяльності [14]. Окрім ферментативної активності, стан енергетичного обміну в клітині оцінюють за вмістом аденілових нуклеотидів (АТФ, АДФ, АМФ), а також шляхом розрахунку низки біоенергетичних індексів.

У результаті досліджень встановлено, що рівновага аденілатного пулу в тканинах риб із забрудненого озера зміщується переважно в бік підвищення частки низькоенергетичних фосфатів у різні сезони року. Так, у м'язах окуня з цього озера у літній період зафіксовано менший вміст АТФ у  $1,61$  та  $1,16$  разів, ніж весною та осінню (рис. 1, а). Також відмічено незначне зниження вмісту АДФ в осінній період порівняно з іншими сезонами. При цьому вміст АМФ залишався на одному рівні.

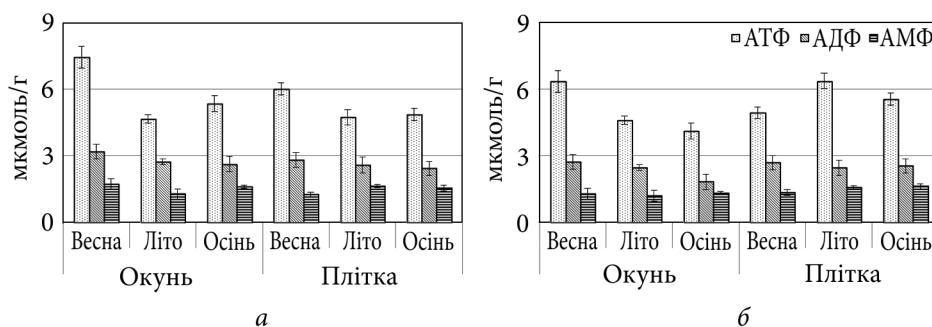


Рис. 1. Сезонна динаміка вмісту аденілових нуклеотидів в м'язах риб з оз. Кирилівського (а) та оз. Бабиного (б),  $M \pm m$ ,  $n = 5$

У м'язах окуня з контрольного озера також зафіксовано нижчий в 1,54 раза вміст АТФ в осінній період порівняно з весняним. При цьому вміст АДФ вірогідно ( $p \leq 0,05$ ) знижувався у напрямку весна  $\rightarrow$  осінь, а кількість АМФ неістотно зростала. Це спричинило зменшення різниці між низькоенергетичними фосфатами, що може вказувати на інтенсивне дефосфорилування АТФ у м'язах окуня з оз. Бабиного.

Отримані дані підтверджують закономірності, які встановлені вище-описаними дослідженнями ферментативної активності м'язів окуня в озерах [16]. Однак зафіксовано і низку відмінностей. Підвищення активності сукцинатдегідрогенази (СДГ) у м'язах окуня з оз. Кирилівського [18] поряд зі зниженням концентрації аденілатів у цей період вказує на активне використання нуклеотидів на процеси енергозабезпечення [20]. Енергозатратні процеси дещо домінують над енергогенеруючими, що може бути пов'язано з екологічними умовами цього озера [9, 10]. Також слід зауважити про періодичне погіршення екологічної ситуації на цій водоймі внаслідок перевищення фонових показників забруднення.

Можна відмітити, що антропогенне навантаження знижує біорізноманіття паразитофауни риб. Найменше паразитарне ураження риб спостерігалось у більш забрудненій водоймі. Це свідчить про наявність негативного впливу токсикантів на риб та їхніх паразитів [3]. За величинами аденілатного пулу в м'язах окуня варто зазначити, що в осінній період вміст АТФ дещо зростає порівняно з літом та збільшується різниця між цим макроергом та АДФ, що свідчить про незначний ресинтез АТФ. Відповідний адаптивний механізм підтримує енергетику тканин на достатньому рівні, що може запобігати розвитку гіпоенергетичного стану м'язів.

У м'язах окуня з контрольного озера зниження вмісту АТФ восени можна розглядати як сповільнення метаболічних реакцій у передзимовий період. Також в оз. Бабиному наявна дещо менша кормова база для окуня. Біомаса кормових організмів у оз. Бабиному становила  $2,16 \text{ г/м}^2$ . У свою чергу в оз. Кирилівському було відмічено найбільшу загальну біомасу бентосних організмів —  $7,7 \text{ г/м}^2$  [3]. Через те, що окунь є факультатив-

ним хижаком, в його раціоні значну частку становлять організми зообентосу, а це може відобразитися на енергетиці організму.

У м'язах плітки з оз. Кирилівського зміни аденілатного пулу аналогічні до м'язів окуня. Варто лише відмітити менш інтенсивне зниження вмісту АТФ (див. рис. 1). У м'язах плітки з контрольного озера вірогідно ( $p \leq 0,05$ ) найвищий вміст АТФ зафіксовано в літній період. При цьому воєсно несуттєво зростає вміст АМФ. Очевидно, у м'язах риб з контрольного озера процеси, які супроводжуються генеруванням енергії, протікають інтенсивніше, ніж у риб із забрудненої водойми. Цікавим також є те, що ця закономірність відмічено в усі досліджувані сезони року.

Незважаючи на різну інтенсивність енергогенеруючих процесів у м'язах окуня з обох озер, суттєвої різниці у співвідношенні аденілатів не зафіксовано. Проте у м'язах плітки незначну реорганізацію у співвідношенні основних компонентів аденілатного пулу все ж встановлено. Найбільш чітко зазначені зміни спостерігаються влітку, а саме: співвідношення АТФ:АДФ:АМФ у м'язах плітки з оз. Кирилівського становило 53:29:18 проти 61:24:15 у контрольному озері (рис. 2).

У м'язах плітки з контрольного озера частка високоенергетичного фосфату (АТФ) вища, а АДФ та АМФ нижча порівняно з оз. Кирилівським. Це дозволяє стверджувати, що в цей період у м'язах плітки з оз. Бабиного активно функціонують аеробні шляхи генерування енергії, оскільки відмічено активне окиснювальне фосфорилування. У плітки з оз. Кирилівського встановлено збільшення частки низькоенергетичних фосфатів, що вказує на функціонування в її організмі малоефективного субстратного фосфорилування та, можливо, одночасного дефосфорилування АТФ [7, 8]. Проте з отриманих результатів видно, що в оз. Кирилівському плітка активно залучає енергетичні ресурси на процеси детоксикації забруднювачів. Подібні механізми можна також розглядати як результат багаторічної адаптації риб до різкого коливання гідроекологічного стану водойми через надходження до неї токсичних сполук. На це вказують численні дослідження, проведені на прісноводних видах, що мешкають у зазначеній водоймі [15, 23].

Реакції енергетичного обміну в зябрах риб більш чутливі до зміни гідроекологічних умов існування та сезонних коливань абіотичних чинників (рН, температури, розчиненого кисню, йонного складу води). Так, у зябрах окуня з оз. Кирилівського зафіксовано вірогідне ( $p \leq 0,05$ ) зниження вмісту АТФ та підвищення вмісту АМФ в осінній період у 1,21 та 1,34 рази відповідно порівняно з весняним (див. рис. 2). При цьому різниця між АДФ та АМФ дуже мала. Очевидно, в респіраторному апараті окуня з цього озера в літній та осінній періоди провідним тимчасовим шляхом генерування енергії є гліколіз, що підтверджується також відповідною активністю ферментів енергетичного обміну [17]. Не виключено, що надмірне антропогенне забруднення озера разом з підвищеною температурою води викликає в окуня активацію процесу гідролізу АТФ для забезпечення нормальної життєдіяльності. Збільшення частки АМФ також

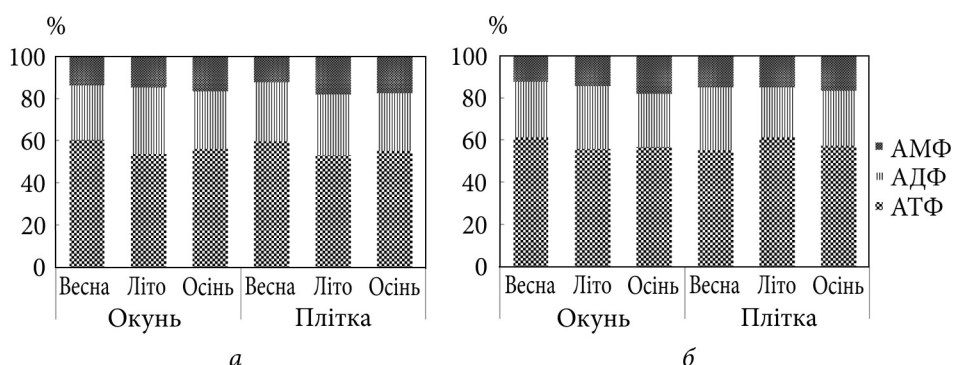


Рис. 2. Співвідношення аденілових нуклеотидів (АТФ:АДФ:АМФ) у м'язах риб з оз. Кирилівського (а) та оз. Бабиного (б),  $M \pm m$ ,  $n = 5$

свідчить про потребу в ресинтезі АТФ, що в цьому випадку відбувається, очевидно, шляхом субстратного фосфорилування [8].

У контрольному озері ситуація дещо інша. Зафіксовано підвищення вмісту АТФ та АДФ у зябрах окуня з оз. Бабиного в осінній період порівняно з весняним у 1,31 та 1,25 раза відповідно (рис. 3). При цьому вміст АМФ практично не змінювався. Очевидно, що в літній та осінній періоди в зябрах окуня з контрольного озера активно функціонує цикл трикарбонних кислот та дихальний ланцюг мітохондрій. Варто зазначити, що один і той самий вид риб з двох різнотипних за гідроекологічними умовами водойм у різні пори року відмінним чином регулює реакції енергозабезпечення тканин свого організму.

В забрудненому озері метаболізм окуня спрямований на активне залучення енергетичних ресурсів на протидію потенційному проникненню токсичних речовин в його організм або ж їхню детоксикацію. У риб з оз. Бабиного рівновага в співвідношенні енергогенерувальних та енергозатратних процесів зберігається протягом усіх досліджуваних сезонів. Це може свідчити про відносно стабільні екологічні умови щодо існування цього окуня.

У зябрах плітки з оз. Кирилівського встановлено вірогідне ( $p \leq 0,05$ ) підвищення вмісту всіх аденілатів восени. Однак найбільшою мірою зріс вміст АМФ — в 1,53 раза порівняно з весняним періодом (див. рис. 3), що спричинило зменшення співвідношення АДФ/АМФ. Очевидно, в зябрах цього виду активуються аеробні процеси, що підтверджується також підвищеною активністю сукцинатдегідрогенази та цитохромооксидази [18, 24]. Причиною підвищення вмісту АМФ поряд з АТФ та АДФ, вірогідно, може бути домінування його синтезу з відповідних попередників над процесами дефосфорилування АДФ [17]. За таких умов збільшується загальний аденілатний пул, що позитивно відбивається на біоенергетичному стані організму плітки. Отже, цей вид компенсує дію токсикантів на свій організм шляхом активування енергогенеруючих процесів метабо-

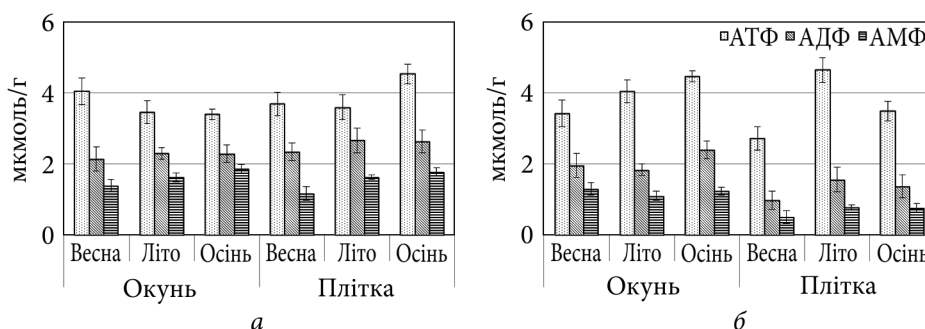


Рис. 3. Сезонна динаміка вмісту аденілових нуклеотидів у зябрах риб з оз. Кирилівського (а) та оз. Бабиного (б),  $M \pm m$ ,  $n = 5$

лізму. Зазначена особливість плітки пов'язана з її поведінковими та фізіологічними характеристиками.

У зябрах плітки з оз. Бабиного мінімальний вміст АТФ, АДФ та АМФ було зафіксовано весною — нижче відповідно у 1,71, 158 та 1,57 раза порівняно з літом. Це свідчить про деяке виснаження організму риб у післязимовий період та під час проходження нересту.

Співвідношення макроергічних сполук у зябрах риб залежить від сезону року. У зябрах окуня з оз. Кирилівського співвідношення аденілатів (АТФ:АДФ:АМФ) у весняний період становило 54:28:18 проти 45:30:25 восени (див. рис. 4). Очевидно, з весни до осені спостерігається тенденція до зниження частки АТФ та підвищення АМФ. Це може бути наслідком активного включення високоенергетичного фосфату в адаптивні процеси, зокрема для детоксикації, що є прямим свідченням переважання в зябрах окуня енергозатратних процесів над енергогенеруючими.

У зябрах окуня з оз. Бабиного встановлено обернену реорганізацію аденілатного пулу. Так, у весняний період співвідношення АТФ:АДФ:АМФ становило 51:30:19, тоді як влітку — 58:26:16. Таким чином, в літній та осінній періоди спостерігається тенденція до зниження частки АМФ та підвищення АТФ порівняно з весною. Біоенергетичний стан зябер окуня весною може бути наслідком післязимового періоду. Порівнюючи результати, отримані з обох озер, можна чітко помітити їхній антибатний характер. Співвідношення аденілових нуклеотидів, як і інші досліджені критерії, дозволяють стверджувати, що в окуня з оз. Кирилівського з весни до осені енергозатратні процеси переважають над енергогенеруючими. Враховуючи несприятливі гідроекологічні умови оз. Кирилівського, можна вважати однією з провідних причин зазначених змін енергетичного стану тканин риб вплив антропогенного забруднення водойми. Практично всі досліджені критерії вказують на те, що риби з забрудненого озера постійно знаходяться в енергетично напруженому стані, що проявляється в активації чисельних альтернативних компенсаторних механізмів енергозабезпечення.

Крім того, це підтверджують дослідження інших біохімічних показників, проведені на інших видах риб, що мешкають у цьому озері. Так, зокрема, було встановлено підвищення вмісту малонового діальдегіду у тканинах окуня та йоржа, посилення процесів фосфорилювання через зростання активності лужної фосфатази [23], активації процесів аеробного окиснення та йонного обміну у краснопірки та карася [15].

У зябрах плітки з оз. Кирилівського протягом усіх сезонів частка АМФ була вищою, ніж у риб з оз. Бабиного. Найбільш чітко це зафіксовано в літній період, коли співвідношення АТФ:АДФ:АМФ у зябрах плітки з оз. Кирилівського було 46:34:20 відповідно проти 67:22:11 у риб з оз. Бабиного (рис. 4). Переважання високоенергетичного фосфату в зябрах плітки з контрольного озера свідчить про кращу енергозабезпеченість респіраторного апарату порівняно із забрудненим озером. Це є черговим підтвердженням переважання енергозатратних процесів над енергогенеруючими та інтенсивного дефосфорилювання АТФ в зябрах плітки з оз. Кирилівського, однією з причин чого може бути дія токсикантів. Печінка риб не менш чутлива до дії абіотичних та антропогенних чинників, ніж інші органи. Так, в печінці окуня з оз. Кирилівського в осінній період виявлено вірогідне ( $p \leq 0,05$ ) підвищення вмісту АМФ в 1,48 раза порівняно з весною та незначна тенденція зниження вмісту АТФ (рис. 5). У риб з оз. Бабиного встановлено також незначні зміни в осінній період, а саме зниження концентрації АДФ в 1,46 раза порівняно з аналогічним показником за весняний період. Варто зазначити, що практично у всіх тканинах окуня з оз. Кирилівського з весни до осені активуються катаболічні реакції, що може бути результатом дії токсикантів антропогенного походження. Однак відповідне систематичне накопичення АМФ несе за собою низку наслідків, зокрема відбувається накопичення вихідного субстрату для подальшого фосфорилювання, що може відбуватись як в аеробних, так і в анаеробних умовах [26]. Отримані результати дозволяють стверджувати, що специфічні умови водойми в комплексі з перемінною абіотичною складовою змушують риб коригувати адаптивні реакції енергетичного обміну з домінуванням енергозатратних процесів.

Стан енергетичного обміну у плітки за відповідними показниками у печінці був зовсім іншим. У риб із забрудненого озера восени зафіксовано зниження вмісту АТФ і АДФ та підвищення АМФ в 1,45, 148 та 1,32 раза відповідно порівняно з весняними величинами (рис. 6). При цьому вміст АДФ та АМФ восени практично зрівнялись, що вказує на активний гідроліз АДФ. Поряд з цим, зниження концентрації АТФ є результатом недостатнього його утворення, оскільки вміст АДФ також пропорційно знижується. Очевидно, в осінній період енергозабезпечення печінки плітки з оз. Кирилівського може мати заощаджувальний характер, що може бути наслідком активації енергозатратних процесів детоксикації та ізоляції організму від токсичного забруднення [22].

У плітки з контрольного озера восени величина всіх досліджених показників вірогідно зростала, а саме зареєстровано вищий вміст АТФ, АДФ та АМФ у 1,72, 1,29 та 1,50 раза відповідно порівняно з весною. Оче-

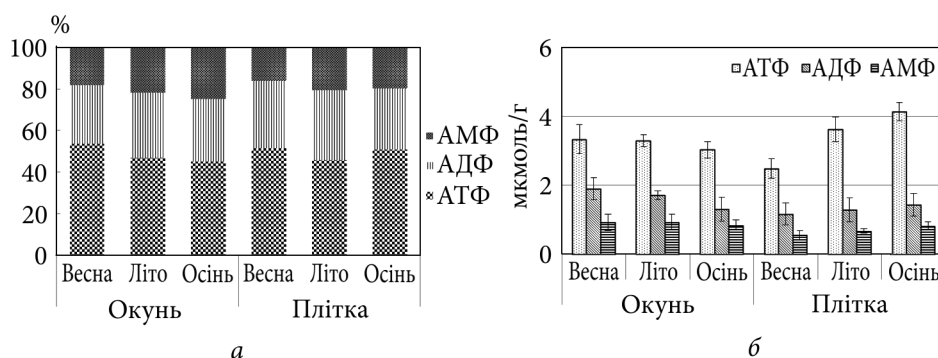


Рис. 4. Співвідношення аденілових нуклеотидів (АТФ:АДФ:АМФ) у зябрах риб з оз. Кирилівського (а) та оз. Бабиного (б),  $M \pm m$ ,  $n = 5$

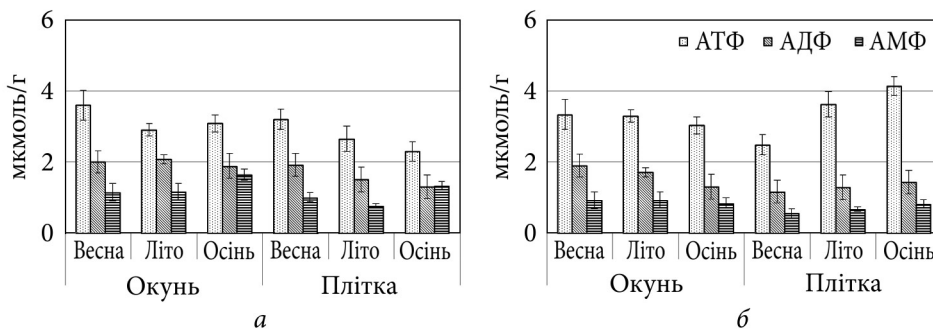


Рис. 5. Сезонна динаміка вмісту аденілових нуклеотидів у печінці риб з оз. Кирилівського (а) та оз. Бабиного (б),  $M \pm m$ ,  $n = 5$

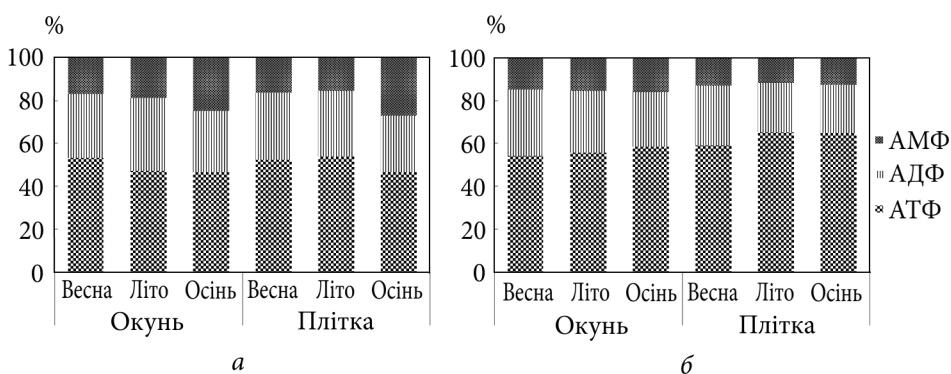


Рис. 6. Співвідношення аденілових нуклеотидів (АТФ:АДФ:АМФ) у печінці риб з оз. Кирилівського (а) та оз. Бабиного (б),  $M \pm m$ ,  $n = 5$

видно після зимового періоду в наступні сезони риби активно відновлюють енергетичні запаси тканин, зокрема накопиченням високоенергетичного фосфату.

Співвідношення аденілатів у печінці риб також характеризується сезонно залежною динамікою. В окуня та плітки із забрудненого озера в осінній період зафіксовано співвідношення АТФ:АДФ:АМФ на рівні 47:28:25 та 46:27:27 відповідно проти 53:30:17 та 52:32:16 весною (див. рис. 5). Це вказує на те, що досліджені види риб подібним чином реагують воєсно на екологічну ситуацію (на момент проведення досліджень) оз. Кирилівського. Отримані результати вказують на посилене накопичення низькоенергетичного фосфату у печінці риб шляхом поступового гідролізу АТФ та АДФ. Також це є свідченням активації катаболічної гілки метаболізму, яка супроводжується використанням великої кількості енергії [17]. Подібний механізм можна розглядати як компенсаторну реакцію риб на хронічну дію несприятливого чинника, а саме надмірного антропогенного забруднення водойми.

У контрольному озері виявлені закономірності не зареєстровані, що вказує на збалансованість процесів енергозабезпечення у тканинах риб з цієї водойми. Якщо розглядати сумарний вміст аденілатів АТФ+АДФ+АМФ у тканинах риб з досліджених водойм у сезонному аспекті, то також можна відмітити низку закономірностей.

У м'язах окуня та плітки з оз. Кирилівського сума аденілатів у літній та осінній періоди вірогідно ( $p \leq 0,05$ ) менша порівняно з весною (рис. 7). Це переважно пов'язано зі зменшенням вмісту АТФ у м'язах риб у ці періоди, коли аденілатний пул представлений високою часткою АМФ.

Зареєстровано поступове накопичення суми аденілових нуклеотидів у зябрах плітки з оз. Кирилівського та вірогідне зниження величини цього показника у її печінці з весни до осені. Перерозподіл аденілатного пулу у тканинах плітки вказує на те, що в її зябрах адаптаційні процеси до зовнішнього середовища відбуваються через активацію енергогенерувальних процесів, тоді як у м'язах енергетичні ресурси активно витрачаються. Це надалі може відбиватись на показниках росту та накопичення енергомістких сполук у тканинах риб. За результатами досліджень встановлено істотні відмінності за вмістом енергомістких/енергоємних сполук у тканинах печінки плітки з різних угруповань. У плітки з оз. Кирилівського встановлено менший вміст глікогену та ліпідів — на 16,6 та

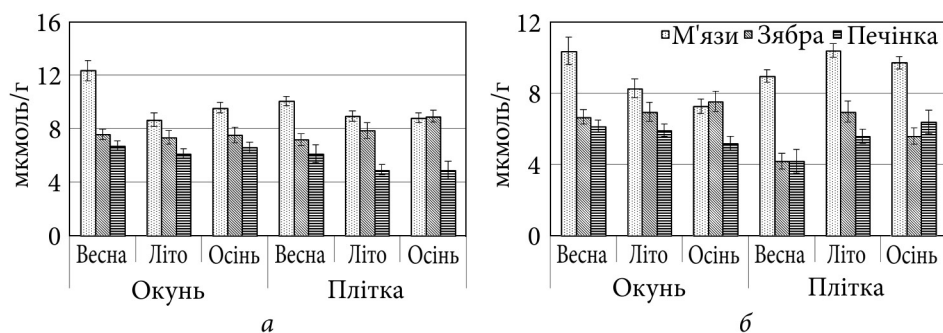


Рис. 7. Сумарний вміст (АТФ+АДФ+АМФ) аденілових нуклеотидів у тканинах риб з оз. Кирилівського (а) та оз. Бабиного (б),  $M \pm m$ ,  $n = 5$

68,65 % відповідно, ніж у плітки з оз. Бабиного [13]. Це може вказувати на те, що риби з оз. Кирилівського (на період проведення досліджень) фізіологічно перебували у пригніченому стані. Високий вміст нафтопродуктів у воді досліджуваного озера [10] вказує на несприятливі екологічні умови для донної фауни озера, зокрема молюсків та інших безхребетних, які є трофічно потенційними об'єктами для живлення плітки. Саме це може суттєво впливати на зміну низки досліджуваних показників. В окуня з контрольного озера за сумою аденілатів у тканинах сезонна динаміка схожа до риб із забрудненого озера, однак пул нуклеотидів був представлений у співвідношенні з переважанням АТФ. Плітка ж з оз. Бабиного до осені накопичує аденілати у всіх досліджених тканинах. Це може свідчити про сприятливі для цього виду екологічні умови існування.

### Висновки

Встановлено, що рівновага аденілатного пулу в тканинах риб із забрудненої водойми (оз. Кирилівське) у різні сезони року зміщується переважно в бік підвищення частки низькоенергетичних фосфатів.

Показано, що у м'язах плітки з оз. Кирилівського зміни аденілатного пулу аналогічні до м'язів окуня. Варто лише відмітити менш інтенсивне зниження вмісту АТФ. Незважаючи на різну інтенсивність енергогенерувальних процесів у м'язах окуня з обох досліджуваних озер, суттєвої різниці у співвідношенні аденілатів не зафіксовано. Проте у м'язах плітки незначну реорганізацію у співвідношенні основних компонентів аденілатного пулу було встановлено. Найбільш чітко зазначені зміни спостерігаються влітку, а саме співвідношення АТФ:АДФ:АМФ у м'язах плітки з оз. Кирилівського становило 53:29:18 проти 61:24:15 у контрольному озері. У зябрах окуня з оз. Кирилівського співвідношення аденілатів (АТФ:АДФ:АМФ) у весняний період становило 54:28:18 проти 45:30:25 восени. Встановлено, що з весни до осені спостерігається тенденція до зниження частки АТФ та підвищення АМФ. Це є наслідком активного включення високоенергетичного фосфату в адаптивні процеси. Це є черговим підтвердженням переважання енергозатратних процесів над енергогенерувальними та інтенсивного дефосфорилування АТФ в зябрах плітки з оз. Кирилівського.

Отримані результати засвідчили, що зміна вмісту аденілатів та їхнього співвідношення є потенційними маркерними показниками для діагностики стану водойм та оцінки фізіологічного стану фонових риб.

### Список використаної літератури

1. Жежеря В.А., Линник П.М., Зубенко І.Б. Уміст та форми знаходження металів у озерах системи Опечень (м. Київ). *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2016. 269. С. 70—86.
2. Зарубина І.В., Криворучко Б.І. Разделение и прямое количественное определение адениннуклеотидов на силуфоле. *Укр. биохим. журнал*. 1982. № 4. С. 437—439.
3. Коваленко Ю.О., Шлапак О.О., Потрохов О.С., Зінковський О.Г. Вплив антропогенного забруднення водойм на фізіолого-біохімічні показники риб та склад їхніх паразитоценозів. *Ribogospod. nauka Ukr.* 2019. 3 (49). С. 72—88.

4. Курило С.М. Основні тенденції багаторічних змін мінералізації води та вмісту головних іонів у річках України. *Гідрохімія. Гідрологія. Гідроекологія*. 2016. 2 (41). С. 85—90.
5. Марценюк В.М. Особливості регуляції енергозабезпечення адаптації риб до дії абіотичних та антропогенних чинників : дис. ... канд. біол. наук. Київ. 2019. 225 с.
6. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / Ред. В.Д. Романенко. Київ : ЛОГОС, 2006. 408 с.
7. Нагорна Н.В., Четвертик Н.А., Федорова А.А. Енергетичний обмін клітини в нормі й патології. Можливості його оцінки. *Клінічна геронтологія*. 2008. № 6. С. 58.
8. Орлова О.А. Лазарчук О.О. Вплив парафармацевтика «Він-Віта» на стан енергетичного обміну в дорослих щурів. *Укр. мед. альманах*. 2009. 12 (5). С. 124—128.
9. Панасюк І.В., Томільцева А.І., Зуб В.В., Погорелова Ю.В. Якість води у міських водоймах та характер освоєння водоохоронних зон (на прикладі озер системи «Опечень», м. Київ). *Екологічна безпека та природокористування*. 2015. 4 (20). С. 63—69.
10. Романенко О.В., Арсан О.М., Кіпніс Л.С., Ситник Ю.М. Екологічні проблеми київських водойм і прилеглих територій. Київ : Наук. думка, 2015. 189 с.
11. Чмиленко Ф.О., Деркач Т.М. Методи атомної спектроскопії: атомноабсорбційний спектральний аналіз. Дн-ск: РБВ ДНУ, 120 с.
12. Alesander A., Verna O.P., Mathur A. Evaluation of changes in metabolic parameters and enzymes involved in metabolic pathway sin *Clarias botrachus* after exposed to phenolic compounds. *Asian J. Biomed. Pharmac. Sci.* 2013. Vol. 3 (21). P. 60—67.
13. Janauer GA. Aquatic vegetation in river floodplains: climate change effects, river restoration and ecohydrology aspects. *Climate Change. Inferences from Paleoclimate and Regional Aspects*. 2012. P. 149—156.
14. Jørgensen C., Enberg K., Mangel M. Modelling and interpreting fish bioenergetics — a role for behaviour, life history traits, and survival trade offs. *Journal of Fish Biology*. 2016. Vol. 88. P. 389—402.
15. Kovalenko Yu.O., Prychepa M.V., Potrokhov O.S., Zinkovskiy O.G. Impact of anthropogenic pollution on activity of the energy metabolism, enzymes in *Carassius auratus* and impact of anthropogenic pollution on activity of the energy metabolism enzymes in *Carassius auratus* and *Scardinius erythrophthalmus*. *Hydrobiol. J.* 2021. Vol. 57, N 1. P. 47—57.
16. Martseniuk V.M., Potrokhov O.S., Zinkovskiy O.G. Physiological-biochemical peculiarities of adaptation of perch and common carp to elevated water temperature. *Hydrobiol. J.* 2017. Vol. 53, N 6. P. 60—67.
17. Martseniuk V. M., Potrokhov O. S., Zinkovskiy O.G. Energy Metabolism in organs and tissues of *Perch fluviatilis* under changes of water temperature. *Hydrobiol. J.* 2018. Vol. 54, N 4. P. 85—94.
18. Martseniuk V.M., Prychepa M.V., Marenkov O.M. Changes of activity of energy and ion exchange enzymes and energy substrates content in tissues of *Perca fluviatilis* and *Rutilus rutilus* under toxic water pollution. *Hydrobiol. J.* 2023. Vol. 59, N 3. P. 66—77.
19. Medovnyk D. V. Ecological-physiological features of native and invasive fish species in small rivers under different degree of transformation. *Hydrobiol. J.* 2019. Vol. 55, N 4. P. 63—74.
20. Müller M., Mentel M., van Hellemond J. et al. Energy metabolism in eukaryotes biochemistry and evolution of anaerobic. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 2012. Vol. 76, N 2. P. 444—495.
21. O'Brien K.M. Mitochondrial biogenesis in cold bodied fishes. *J. Exp. Biol.* 2011. Vol. 214. P. 275—285.
22. Pandion T.J. Fish Animal Energetic. Vol. 2. / Bivalvia through Reptilia. Ed. by T.J. Pandion, F.J. Vemberg. San Diego, Calif. : Acad. Press, 1987. 357—465 p.
23. Prychepa M.V., Potrokhov O.S., Zinkovskiy O.G. Peculiarities of biochemical response of fish to anthropogenic load under conditions of urbanization. *Hydrobiol. J.* 2019. Vol. 55, N 3. P. 44—52.

24. Romanenko V.D., Arsan O.M., Arsan O.M. Mechanisms of energy generation in carp organism at adaptation to changes of copper and manganese ions concentration in water. *Hydrobiol. J.* 2018. Vol. 54, N 4. P. 85—94.

25. Romanenko V.D., Medovnyk D.V. Species composition and ecological characteristics of the fish fauna of small rivers of urban territories. *Hydrobiol. J.* 2017. Vol. 53, N 6. P. 3—11.

26. Somero G.N. The physiology of global change: linking patterns to mechanisms. *Ann Rev. Mar. Sci.* 2012. Vol. 4. P. 39—61.

Надійшла 9.11.2023

V. Martseniuk, PhD (Biol.), Junior Researcher,  
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,  
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine,  
e-mail: wmarzenuk@gmail.com  
ORCID 0000-0002-9998-0445

O. Potrokhov, Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Head of Department,  
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,  
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine,  
e-mail: apotrokhov@gmail.com  
ORCID 0000-0002-8274-6898

#### CHARACTERISTICS OF THE ENERGY SUPPLY OF PERCH TISSUES AND TILES UNDER EXCESSIVE ANTHROPOGENIC LOAD

The changes in the content and ratio of adenylate nucleotides (ATP, AMP, ADP) in the tissues of perch and roach in the conditions of anthropogenic pollution of Kyiv's reservoirs during different seasons were studied.

It was established that the balance of the adenylate pool in the tissues of fish from the polluted reservoir shifts mainly towards an increase in the proportion of low-energy phosphates in different seasons of the year compared to the control. A slight reorganization was established in the ratio of the main components of the adenylate pool in the muscles of roach. These changes are most clearly observed in summer, namely the ratio of ATP:ADP:AMP in the muscles of roach from the polluted lake was 53 %, 29, 18 % against 61 %, 24, 15 % in the control lake. In the gills of the perch from the experimental lake, the ratio of adenylates (ATP:ADP:AMP) in the spring period was 54:28:18 against 45:30:25 in the fall. Obviously, from spring to autumn, there is a tendency to decrease the share of ATP and increase AMP. This is a consequence of the active involvement of high-energy phosphate in biochemical reactions aimed at adaptation, which confirms energy-consuming processes over energy-generating ones. It is possible that during the stay in such conditions, the roach developed effective adaptive mechanisms to counteract the polluted environment, which are manifested differently than in the perch, which also confirms the presence of interspecific reactions in taxonomically and ecologically distant species.

It has been proven that changes in the content of adenylates and their ratio are potential marker indicators for diagnosing the physiological state of representatives of the ichthyofauna of the city's reservoirs.

**Key words:** perch, roach, energy-generating processes, adenyl nucleotides, anthropogenic pollution, adaptive reactions.