

УДК: 582.26/27 (282.247.322)

Ю.С. ШЕЛЮК, д. б. н., проф.,
Житомирський державний університет ім. І. Франка,
вул. В. Бердичівська, 40, Житомир, 10002, Україна,
e-mail: Shelyuk_Yulya@ukr.net
ORCID 0000-0001-6429-1028

ОСОБЛИВОСТІ ПРОДУКЦІЙНО-ДЕСТРУКЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ШТУЧНО СТВОРЕНИХ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Досліджено вплив чинників середовища на особливості процесу первинного продукування у водоймах, які утворились на місці затоплених кар'єрів із видобутку піску та гранітів. Встановлено, що високий рівень первинного продукування є найважливішим механізмом сукцесії фітопланктону водойм антропогенного походження, який обумовлює утворення органічної речовини і насичення води киснем, що впливає на фізико-хімічні властивості вод. Показано, що у досліджуваних водних екосистемах переважають «молоді» і «рівноважні» стани.

Ключові слова: первинна продукція, фітопланктон, деструкція органічної речовини, кар'єри, сукцесія, баланс органічної речовини.

Глобальні та регіональні природно-соціальні зміни, клімато-екологічна трансформація територій та фактори антропогенної діяльності не тільки прямо впливають на чисельність і видове багатство угруповань, а й змінюють середовище існування організмів та біотичні взаємодії, і, таким чином, обумовлюють вплив на продуктивність, стійкість та розвиток екосистем. Водойми, утворені в процесі затоплення кар'єрів із видобутку корисних копалин, є новим типом водойм та невід'ємним елементом ландшафтів. Дослідження цих водних об'єктів є актуальними, оскільки дають змогу встановлювати механізми впливу антропогенної діяльності на перебіг продукційно-деструкційних процесів у штучно створених екосистемах. Розуміння цих закономірностей є вкрай важливим для розробки методів моніторингу та менеджменту екосистем за різних рівнів антропогенної трансформації, необхідних для забезпечення належного рівня їхніх функцій та екологічних сервісів.

Мета роботи — встановити основні закономірності перебігу процесів первинного продукування у штучно створених водних екосистемах.

Ц и т у в а н н я: Шелюк Ю.С. Особливості продукційно-деструкційних процесів у штучно створених водних екосистемах. *Гідробіол. журн.* 2021. Т. 57. № 6. С. 21—36.

Матеріал і методика досліджень

В основу роботи покладено узагальнення даних, отриманих упродовж 2007—2020 рр. на затоплених кар'єрах із видобутку корисних копалин, які знаходяться в басейнах річок Прип'ять і Тетерів: гранітних — Богунському (50°17'23.2" N 28°36'30.0" E), Соколовському (50°17'36" N 28°38'27" E), Сонячному (50°58'08.6" N 28°43'23.3" E) (околиці м. Житомира), Цегельному (50°56'24.0" N 28°39'50.5" E) (м. Коростень, Житомирська обл.) і Морозівському (50°37'21.7" N 27°07'20.5" E) (Корецький р-н, Рівненська обл.); піщаних — Селецькому (50°13'42.3" N 28°44'26.4" E) та Слобідському (50°13'43.3" N 28°43'48.5" E) (м. Житомир). Морфометричні характеристики водойм наведені нами у попередній публікації [16].

Загалом граничні середні значення прозорості води кар'єрів упродовж вегетаційних сезонів були в межах $0,95 \pm 0,02$ — $1,35 \pm 0,03$ м, при цьому мінімальні її значення фіксували раною весною. Середні значення кольоровості води змінювались від $19,2 \pm 0,9^\circ$ до $32,4 \pm 1,6^\circ$. Гідрохімічні показники води водойм антропогенного походження наведено в таблиці 1.

Первинну продукцію планктону та деструкцію органічної речовини визначали кисневою модифікацією склянкового методу у добовій експозиції на горизонтах 0,10, 0,25, 0,5 і 1,0 м згідно загальноприйнятих методик, описаних раніше [25—27]. Розрахунок інтегральної продукції ΣA під 1 м² здійснювали множенням інтенсивності фотосинтезу на глибині максимуму A_{\max} і прозорості води на станції, інтегральну деструкцію ΣR визначали множенням R та середніх значень глибини водних об'єктів, що дозволяє уникнути впливу на результати досліджень «випадкових» глибин окремих станцій [1, 7].

Для перерахунку кисневих одиниць на енергетичні використовували коефіцієнт 3,51 мг O₂/кал [1]. Оцінку сукцесійного стану водних екосистем здійснювали за індексом зрілості θ , запропонованим В.Є. Виноградовим та Є.О. Шушкіною [2], в інтерпретації Н.М. Мінеєвої $\theta = \lg \Sigma R / \Sigma A$ [7]. У залежності від величини θ розрізняють такі стани планктонних угруповань: початковий, молодий, рівноважний, розвинутий, зрілий та деградуєчий.

Початковий. Короткочасний стан, який виникає у момент створення умов для розвитку угруповання (наприклад, стан ценозів перед початком весняної вегетації фітопланктону). Він не має певних величин θ .

Молодий. Також порівняно короткочасний стан, що охоплює період спалаху у розвитку фітопланктону. Продукція фотосинтезу максимальна, біомаса водоростей стрімко зростає і може досягти максимальних величин. Біомаса зоопланктону порівняно невелика. Величина індексу зрілості складає $-0,7$ — $-0,2$, у середньому сягає $-0,5$.

Рівноважний. Зміна продукційної фази розвитку угруповання на деструкційну. Приблизна рівновага продукційних та деструкційних процесів. Біомаса фітопланктону зменшується, а зоопланктону — ще не досягає максимуму. Індекс зрілості близький до 0, змінюючись від $-0,2$ до $+0,2$.

Таблиця 1

Гідрохімічні характеристики вод водойм антропогенного походження

Кар'єри	Гідрохімічні показники										
	рН	вміст розчиненого у воді кисню, мг О ₂ /дм ³	перманганатна окисність, мг О ₂ /дм ³	кальцій, мг/дм ³	магній, мг/дм ³	залізо загальне, мг/дм ³	хлориди, мг/дм ³	сульфати, мг/дм ³	фосфор фосфатів, мг/дм ³	нітроген загальний, мг/дм ³	
Богунський	6,81±0,02	7,92±0,10	6,81±0,08	1,50±0,10	4,00±0,12	0,18±0,011	28±3,2	29±1,4	0,075±0,001	2,654±0,12	
Сонячне	7,14 ±0,01	8,33 ±0,29	6,54 ±0,04	3,00±0,09	5,60±0,10	0,15±0,010	32±2,4	53±4,1	0,065±0,002	3,654±0,31	
Слобідський	6,22 ±0,03	7,44 ±0,36	6,20 ±0,08	5,05 ±0,11	6,42±0,11	0,04±0,006	21±1,9	56±2,6	0,088±0,001	4,654±0,28	
Селецький	6,92 ±0,02	7,40 ±0,40	6,22 ±0,12	5,24±0,08	6,24±0,14	0,02±0,004	19±1,7	54±4,8	0,081±0,002	4,812±0,54	
Соколовський	7,20 ±0,04	8,83 ±0,32	2,32 ±0,08	2,14±0,05	3,62±0,12	0,12±0,007	14±2,1	—	0,001±<0,001	0,670±0,08	
Морозівський	7,04 ±0,02	7,20 ±0,18	6,55 ±0,05	3,01±0,07	5,60±0,10	0,15±0,008	32±2,5	45±3,1	0,075±0,002	3,526±0,24	
Цегельний	7,00 ±0,03	8,43 ±0,33	6,11 ±0,10	1,54±0,12	3,41±0,11	0,18±0,012	28±2,1	—	0,080±0,001	2,637±0,23	

Примітка. «—» — визначення не проводили.

Розвинутий. Біомаса фітопланктону продовжує знижуватись, а бактеріопланктону — залишається порівняно високою, зоопланктону — продовжує збільшуватись і досягає максимуму. Індекс зрілості в середньому складає 0,6, межі його коливань становлять 0,2—1.

Зрілий. Максимальна довжина трофічних ланцюгів і найбільше видове багатство. Низька тотальна біомаса та біомаса нижчих трофічних рівнів. Стан, близький до клімаксного. Індекс зрілості в межах 1—2.

Деградуєчий. Подальше зниження біомаси всіх трофічних рівнів. Збіднення видового складу. Досить низькі величини первинної продукції. Індекс зрілості >2.

Розрахунок інтенсивності сонячної радіації (Q) проводили згідно [17] із використанням даних таблиць ТМ-12 актинометричних спостережень на станціях Бориспіль і Ковель за 2007—2018 рр., отриманих в архіві Центральної геофізичної обсерваторії [11, 12].

Біомасу фітопланктону визначали розрахунково-об'ємним методом. Оцінку трофічного статусу вод проводили згідно [6].

Паралельно з відбором альгологічних проб вимірювали температуру води ртутним термометром ТБ-3-М1; прозорість — за диском Секкі; кольоровість — за допомогою біхроматно-кобальтової шкали; pH — рН-метром 150М; вміст розчиненого у воді кисню — методом Віклера [6]; вміст нітрогену нітратів — за ГОСТ 18826-73 [3] калориметричним методом із фенолдисульфо кислотою; нітрогену амонійного і нітритного — за ГОСТ 4192-82 [4], із подальшим перерахунком у загальний нітроген; фосфору фосфатів — за ДСТУ ISO 6878-2003 спектрометричним методом [5]. Гідрохімічні і гідрофізичні аналізи проводили посезонно впродовж 2010—2019 рр.

Статистичну обробку отриманих даних проводили за допомогою стандартних методів, реалізованих у пакеті статистичних програм Microsoft Excel та STATISTICA 6.0 (StatSoft, USA, 2006). У роботі обговорюються лише значимі кореляції ($p < 0,05$). Оцінюючи силу зв'язку між змінними за допомогою коефіцієнту кореляції r , його вважали слабким за $r < 0,3$, помірним — за $r = 0,3—0,7$, сильним — за $r > 0,7$. Для отримання узагальнюючих характеристик одержаних натурних даних розраховували середні їхні значення і виражали як середнє значення \pm стандартна похибка ($x \pm SE$).

Результати досліджень та їх обговорення

Штучно створені водні об'єкти, зокрема утворені шляхом затоплення колишніх кар'єрів із видобутку корисних копалин, є «білою плямою» у сучасній гідроекології щодо продукційних можливостей їхніх екосистем. Наявні в літературі відомості щодо такого типу водойм переважно стосуються їхнього подальшого відновлення та використання в якості джерела водних ресурсів у промисловості і сільському господарстві, енергетиці і рекреації [18—21]. Знайдено поодинокі праці, які стосуються трансформації гідрохімічного і гідродинамічного режиму кар'єрів [22, 23]. Вивчення sukcesії угруповань гідробіонтів, перетворення і накопичення енергії

в кар'єрах необхідне хоча б з огляду на їхнє значне поширення не лише на території України [8], а й у країнах Європи, Азії та Америки. Часткове висвітлення результатів досліджень продукційно-деструкційних процесів у кар'єрах із видобутку гранітів та піску було здійснено авторкою у попередніх роботах [15, 16], проте вивчення механізмів, які лежать в основі сукцесії автотрофної ланки для емерджентних функцій штучно створених екосистем, таких як запасання, потік та втрати енергії і речовини в трофічній мережі екосистеми, залишаються актуальними.

Встановлено, що штучні водойми мають досить високу інтенсивність первинного продукування, що визначає подальшу сукцесію їхніх екосистем (рис. 1, 2).

Упродовж вегетаційних сезонів середня інтенсивність первинної продукції для горизонту максимального фотосинтезу у досліджуваних кар'єрах була в межах $1,26 \pm 0,18$ — $5,00 \pm 0,37$ мг O_2 /(дм³·добу), інтегральної продукції — $2,48 \pm 0,20$ — $6,59 \pm 0,83$ г O_2 /(м²·добу). Найнижчі показники A_{max} фіксували у Соколовському кар'єрі, ΣA — в Морозівському, найвищі — у піщаних Слобідському та Селецькому.

Проведена оцінка трофічного статусу кар'єрів за інтенсивністю фотосинтезу фітопланктону дозволила характеризувати Богунський, Сонячний, Соколовський і Морозівський кар'єри як евтрофні, а Слобідський, Селецький і Цегельний — як ев-політрофні. Зростання рівня трофності особливо помітне в піщаних кар'єрах Слобідському і Селецькому, що, ймовірно, обумовлено значним біогенними навантаженням (в них відмічали найвищий серед досліджуваних водойм рівень накопичення загального нітрогену — відповідно 4,654 і 4,812 мг N/дм³).

Вивчення особливостей перебігу продукційних процесів у кар'єрах у сукупності з факторами середовища дозволило встановити провідну роль вмісту загального нітрогену та кольоровості вод у формуванні валової та інтегральної первинної продукції. Сонячна радіація чинить помірний вплив на продукційні процеси. Вплив температури води слабкий. Встановлено пряму залежність між первинною продукцією та вмістом розчиненого у воді кисню й рН, зворотну — з прозорістю води. Це вказує на середовищеутворюючу роль продукційних процесів у формуванні світлового і газового режиму штучних водойм, а також зміщення рН у лужний бік (табл. 2).

Сумарна за вегетаційні сезони 2007—2020 рр. первинна продукція у колишніх затоплених кар'єрах сягала від 167 до 431 г С/м².

Розрахунок добових P/B -коефіцієнтів¹ засвідчив високу функціональну активність фітопланктону у більшості досліджуваних водойм. Питома продукція водоростей найвищою була у силікатних кар'єрах — Селецькому та Слобідському (відповідно $2,500 \pm 0,31$ і $1,921 \pm 0,36$). У гранітних кар'єрах цей показник був у межах $0,385 \pm 0,01$ — $1,889 \pm 0,34$ (див. рис. 1). Встановлено прямий зв'язок між P/B -коефіцієнтами і первинною про-

¹ P/B -коефіцієнти розраховані для горизонту максимального фотосинтезу за добу.

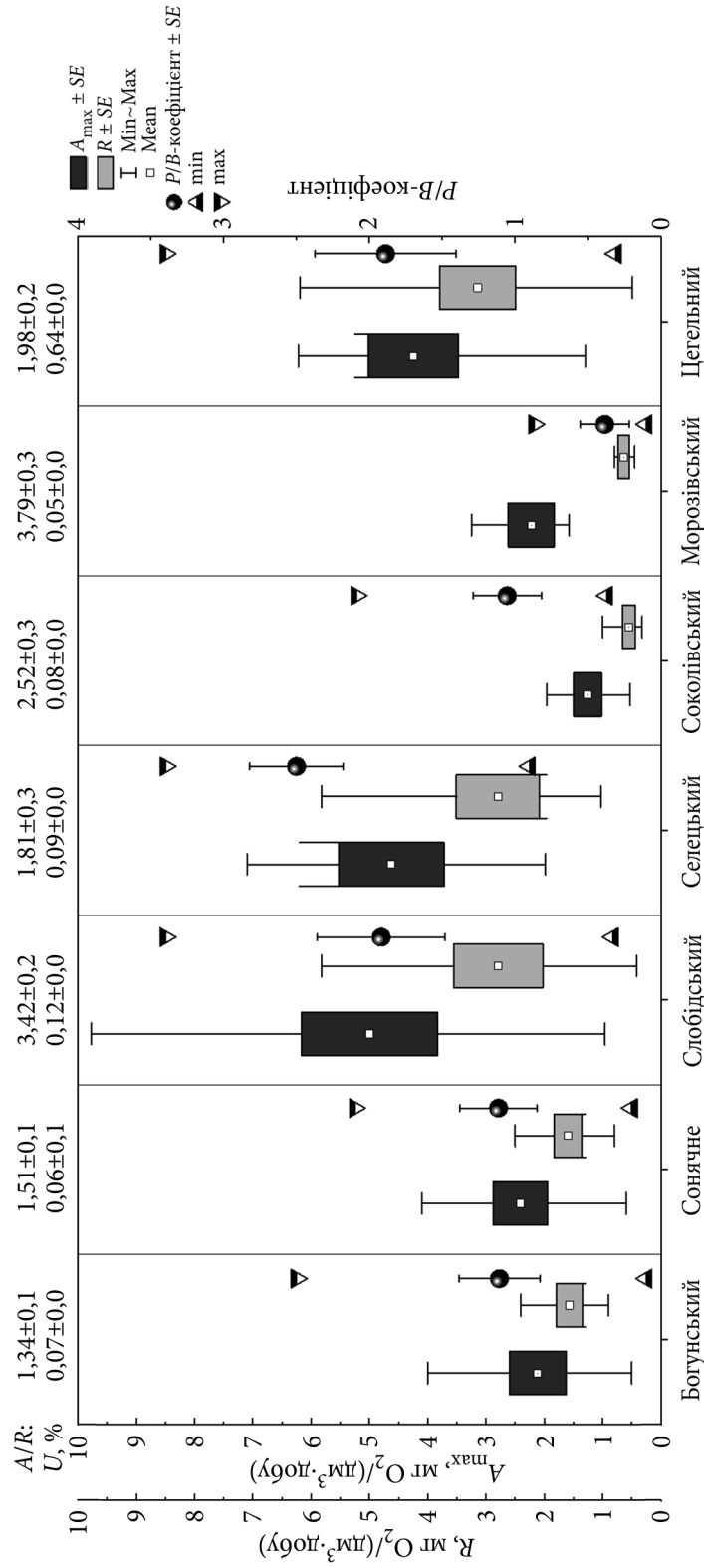


Рис. 1. Показники первинної продукції фітопланктону та деструкції органічної речовини, ефективності утилізації сонячної енергії, P/B -, A/R -коєфіцієнти шгучних водойм. На рис. 1, 2 наведено середні значення показників та їхня стандартна похибка (SE)

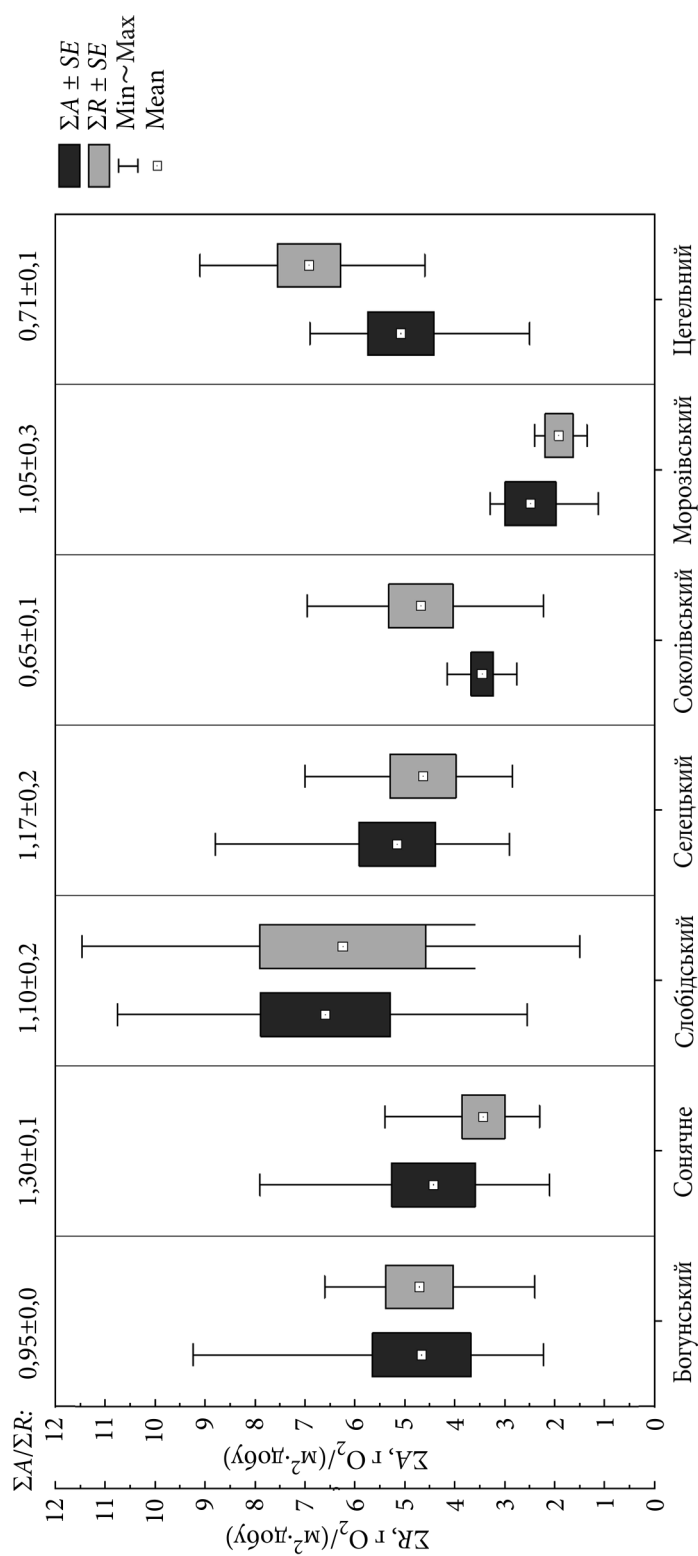


Рис. 2. Показники інтегральної первинної продукції фітопланктону та деструкції органічної речовини, $\Sigma A/\Sigma R$ -коефіцієнти шгучних водойм ~

дукцією планктону: валовою та інтегральною (відповідно $r = 0,40$, $p = 0,00002$ і $r = 0,84$, $p = 0,000001$; $n = 58$). Отже, у водоймах антропогенного походження зростання інтенсивності первинного продукування зумовлює підвищення функціональної активності водоростей планктону. Величини добових P/B -коефіцієнтів суттєво змінювались впродовж вегетаційних сезонів, при цьому спостерігали три максимуми значень — у травні, червні та жовтні.

Для кількісного вираження залежності між первинною продукцією та біомасою фітопланктону також було використано зворотній до P/B -коефіцієнту показник *turnover time* (час відновлення біомаси) [13]. У досліджуваних водоймах час відновлення біомаси фітопланктону на глибині максимального фотосинтезу у середньому за вегетаційні сезони коливався від $0,498 \pm 0,05$ до $1,487 \pm 0,37$, тобто на відновлення біомаси фітопланктону на глибині максимального фотосинтезу потрібно від половини до півтори доби.

Біомаса фітопланктону мала помірний вплив на інтегральну продукцію ($r = 0,51$, $p = 0,0004$, $n = 90$).

Загалом граничні середні значення ефективності утилізації сонячної енергії впродовж вегетаційного сезону були в межах $0,046 \pm 0,035$ — $0,641 \pm 0,036$ %. Встановлено позитивну кореляцію між екологічною ефективністю первинного продукування у кар'єрах та інтенсивністю фотосинтезу ($r = 0,68$, $p = 0,00002$, $n = 56$),

Валова первинна продукція фітопланктону на глибині максимального фотосинтезу (здебільшого на глибині 0,2 м) впродовж вегетаційного сезону перевищувала швидкість деструкції (середня інтенсивність деструкції органічної речовини R була в межах $0,55 \pm 0,09$ — $3,14 \pm 0,29$ мг $O_2/(дм^3 \cdot добу)$, інтегральної деструкції ΣR — $1,91 \pm 0,28$ — $6,91 \pm$

Таблиця 2

Характеристика зв'язку між первинною продукцією і деякими чинниками середовища у водоймах, які утворились на місці затоплених кар'єрів

Показники	A_{max}				ΣA			
	r	F	p	n	r	F	p	n
Сонячна радіація	0,33	390	<0,000001	60	0,31	397	<0,000001	60
Температура води	0,18	2,18	0,000013	60	0,16	2,22	0,000003	60
Прозорість	-0,67	836	<0,000001	60	-0,55	884	<0,000001	60
Кольоровість	0,78	9,2	<0,000001	46	0,51	9,5	<0,000001	46
Вміст розчиненого у воді кисню	0,50	6,1	0,000162	84	0,38	6,0	<0,000001	84
pH	0,48	19,9	<0,000001	66	0,77	19,5	<0,000001	46
Загальний нітроген	0,77	14,12	0,003900	46	0,73	14,34	0,003100	46

П р и м і т к а. Тут і в табл. 3: F — критерій Фішера.

0,21 г O₂/(м²·добу). Найбільші середні показники деструкції органічної речовини фіксували у Цегельному кар'єрі.

Встановлено тісний прямий зв'язок між інтенсивністю деструкційних процесів і кольоровістю, помірний — із вмістом розчиненого у воді кисню та загального нітрогену, а також рівнем рН, який, в свою чергу, формується під впливом процесів синтезу та окиснення органічної речовини (табл. 3).

Залежність рівня деструкції органічної речовини від кисневого режиму обумовлена інтенсифікацією окисних процесів під дією кисню. Слабка залежність від температури (на відміну від природних вод — річок і озер, а також водосховищ [15, 27]) свідчить про те, що температурний показник не є визначальним чинником у регуляції ферментативних дихальних процесів у штучно створених водоймах.

Оскільки кисень інтенсифікує окиснювальні процеси [7], очевидно, що деструкційні процеси у досліджуваних екосистемах тісно пов'язані з продукційними (див. табл. 3). Це свідчить про те, що новоутворена легко-окиснювана органічна речовина відразу включається в біотичний кругообіг. Математичний вираз зв'язку R із A_{\max} (рис. 3) дозволяє оцінити витрати первинної продукції, утвореної в процесі фотосинтезу, на обмінні процеси планктону у водоймах, які виникли на місці затоплених кар'єрів. Одержане рівняння залежності R від A_{\max} вказує на те, що в середньому за вегетаційний сезон майже половина добової продукції фотосинтезу в одиниці об'єму піддається біологічному окисненню.

Таблиця 3

Характеристика зв'язку між деструкцією органічної речовини і первинною продукцією і деякими чинниками середовища у водоймах, які утворились на місці затоплених кар'єрів

Показники	R				ΣR			
	r	F	p	n	r	F	p	n
ΣA	0,85	2,1	<0,000001	58	0,77	1,2	0,45	60
A_{\max}	0,79	1,9	<0,000001	58	0,68	1,2	0,019	60
Сонячна радіація	0,14	389,3	<0,000001	60	0,24	385,4	<0,000001	60
Температура води	0,07	2,2	<0,000001	60	0,16	2,2	0,000028	60
Прозорість	-0,87	1819	<0,000001	60	-0,70	715	<0,000001	60
Кольоровість	0,83	9,1	<0,000001	46	0,73	9,8	<0,000001	46
Вміст розчиненого у воді кисню	0,55	2,9	<0,000001	62	0,54	7,4	<0,000001	84
рН	0,52	9,5	<0,000001	66	0,52	24,1	<0,000001	60
Загальний нітроген	0,65	1,5	0,014000	46	0,02	1,7	0,000092	46

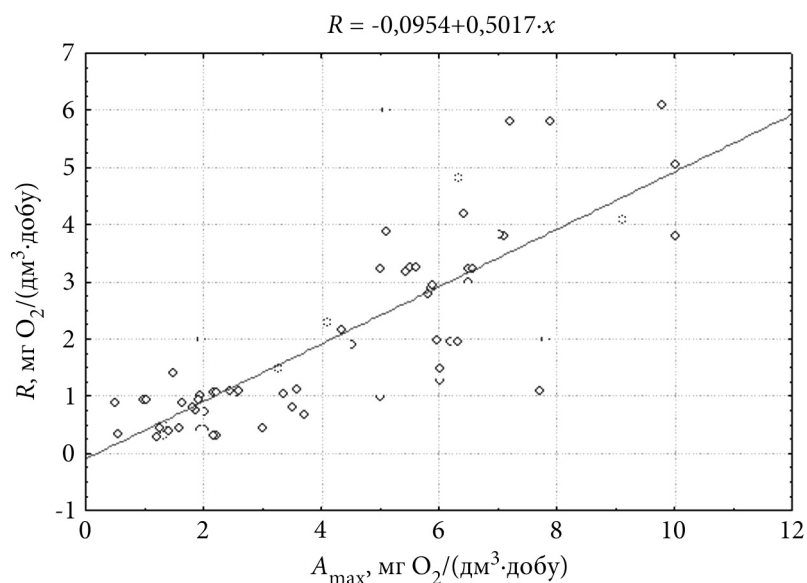


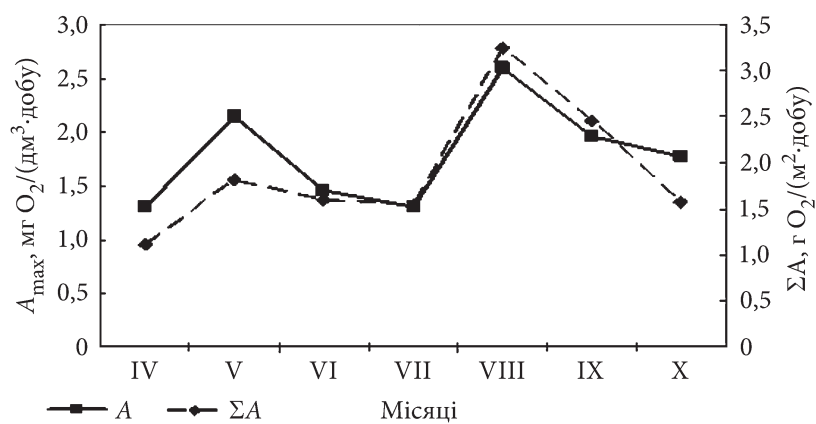
Рис. 3. Залежність R від A_{\max} у штучних водоймах, утворених на місці затоплених кар'єрів

Сезонну сукцесію валової та інтегральної первинної продукції і деструкції органічної речовини у штучних водоймах вивчали на прикладі гранітного Богунського і піщаного Слобідського кар'єрів (рис. 4).

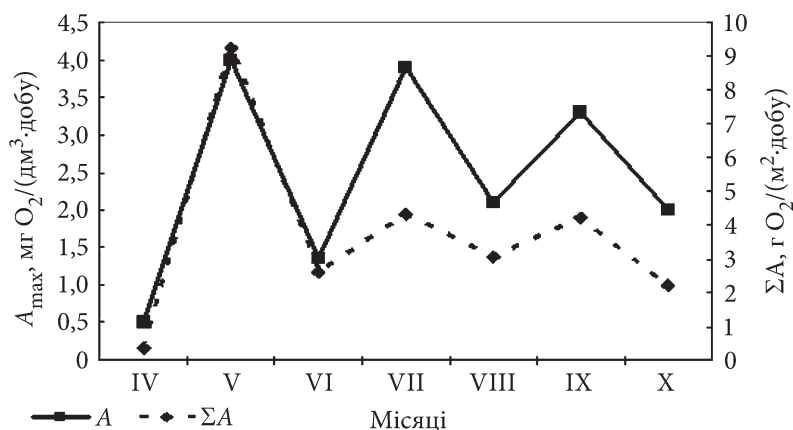
Встановлено, що навесні, з активізацією вегетації фітопланктону, відбувалось зростання інтенсивності фотосинтезу. Весняний максимум первинної продукції спостерігали у середині травня. Здебільшого впродовж літа та першої половини осені фіксували досить високі показники первинної продукції. Після їхнього осіннього максимуму, який у гранітних кар'єрах відмічали на початку, а в піщаних — у кінці вересня, інтенсивність продукційних процесів знижувалася в часі, досягнувши мінімальних значень у середині листопада. На відміну від водосховищ і природних вод, у кар'єрах спостерігалось декілька піків первинної продукції фітопланктону, що зумовлено змінами його структури [16].

У березні — першій половині квітня деструкційні процеси переважали над продукцією. Весняний максимум деструкції органічної речовини фіксували у кінці березня. Згодом вона незначно зменшилась. Подальше зниження інтенсивності деструкційних процесів відбувалось нерівномірно, з періодичною незначною інтенсифікацією процесів дихання. Осінній максимум деструкції припадав на кінець жовтня — початок листопада (рис. 5).

Для об'єктивної оцінки потоків енергії у водних екосистемах важливо враховувати енергетичні втрати її окремих компонентів [9, 24, 28]. Для оцінки дихальних втрат фітопланктону традиційно використовують розрахункові методи [10], враховуючи, що на дихання припадає певна частка



a



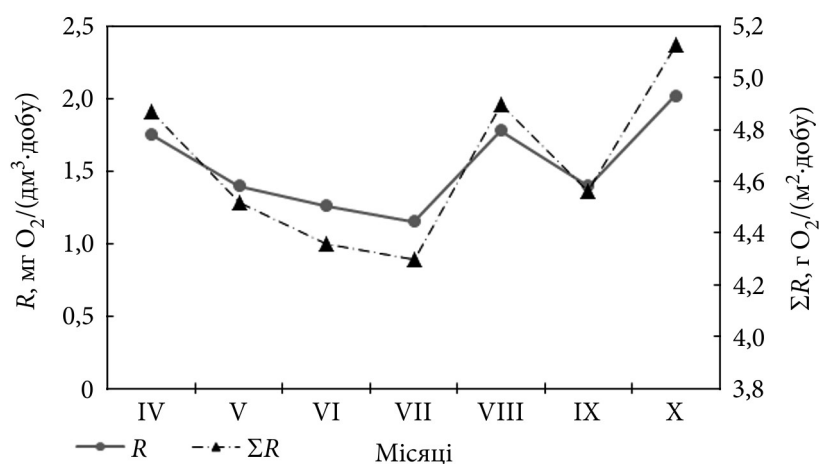
б

Рис. 4. Сезонна динаміка первинної продукції у Слобідському (а) та Богунському (б) кар'єрах (на прикладі вегетаційного сезону 2017 р.)

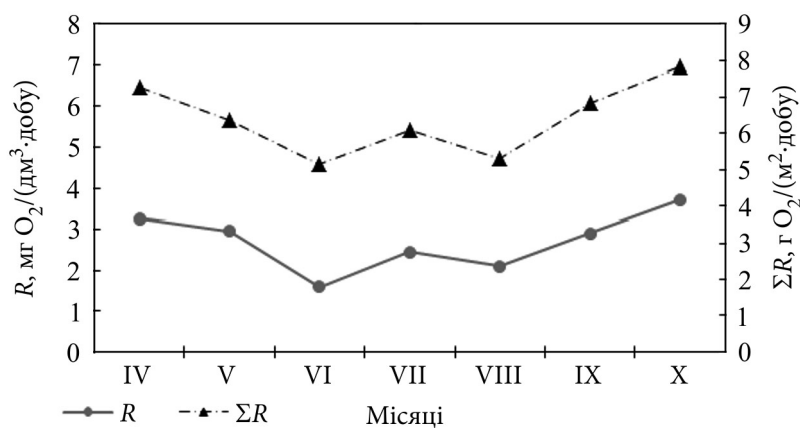
добового фотосинтезу [7, 9, 29]. Прирівнявши власне дихання водоростей до 10 % A_{\max} , встановили, що на власний обмін водоростей у штучних водоймах витрачається від 6 до 13 % валової первинної продукції; у вигляді доступної наступним трофічним рівням чистої продукції в евфотній зоні водойм залишається від 49 до 79 % валової продукції. Дихальні втрати фітопланктону складають у середньому від 6 до 27 % (табл. 4).

Загалом відношення A/R у штучних водоймах коливалось у широких межах (на глибині максимального фотосинтезу цей показник змінювався від 0,87 до 6,50). На поверхневих горизонтах $A < R$ фіксували у березні та в листопаді, коли інтенсивність первинної продукції низька; із середини квітня до кінця жовтня здебільшого A/R .

Показник $\Sigma A/\Sigma R$ вказує на автотрофну спрямованість продукційно-деструкційних процесів у Сонячному, Слобідському, Селецькому та Мо-



а



б

Рис. 5. Сезонна динаміка деструкції органічної речовини у Слобідському (а) та Богунському (б) кар'ерах (на прикладі вегетаційного сезону 2017 р.)

розівському кар'ерах, властиву водним екосистемам з високою продуктивністю, оскільки в евтрофних умовах збільшується частка енергії, яка використовується на створення первинної продукції, при цьому зменшується частка енергії, яка розсіюється. У Соколовському, Цегельному і Богунському — відмічаємо домінування гетеротрофної фази. Проведений кореляційний аналіз засвідчив помірний зв'язок A/R і $\Sigma A/\Sigma R$ з біомасою фітопланктону ($r = -0,42$, $p = 0,0006$ і $r = 0,26$, $p = 0,005$, $n = 60$). Серед абіотичних чинників, які аналізувалися, помірний вплив на A/R чинить вміст загального нітрогену ($r = 0,42$, $p = 0,00001$, $n = 46$), кольоровість ($r = -0,46$, $p = 0,00006$, $n = 46$), прозорість ($r = -0,37$, $p = 0,00002$, $n = 60$), слабкий — сонячна радіація ($r = 0,25$, $p = 0,0008$, $n = 60$). Виявлено сильну достовірну позитивну кореляцію між $\Sigma A/\Sigma R$ і вмістом загального нітрогену ($r = 0,85$, $p = 0,000001$, $n = 46$).

Аналіз змін індексу зрілості засвідчив, що досліджувані штучно створені водні екосистеми не досягають «зрілого» стану. У кар'єрах переважають ранні стадії сукцесії з домінуванням «молодих» і «рівноважних» угруповань. Весняний розвиток фітопланктону таких водойм починається «розвинутим» станом ($\theta = +0,39—+0,51$) з переходом до «молодого» ($\theta = -0,27—-0,32$) наприкінці весни, а на початку літа — до «розвинутого» ($\theta = +0,26—+0,97$). У середині червня переважав «рівноважний» стан, який тривав до кінця жовтня ($\theta = -0,15—+0,15$), і періодично чергувався з «молодим» ($\theta = -0,22—-0,31$). Загалом вегетаційний сезон завершився «розвинутим» станом ($\theta = +0,37—+0,43$). Переважанню «молодих» і «рівноважних» станів сприяє не лише високий вміст біогенів у цих водоймах, але й відносно короткий період їхнього існування.

Установлено, що показник $A_{\max}/\Sigma A$ у досліджуваних водоймах змінювався від 0,40 до 1,44, досягаючи максимальних значень навесні. У зоні оптимального фотосинтезу у гранітних кар'єрах у середньому синтезувалося 47—93 %, а у піщаних — 66—75 % сумарної органічної речовини. Порівняння цих показників з умовною прозорістю води досліджуваних водойм підтверджує встановлену для річок, озер та водосховищ тенденцію зростання відношення $A_{\max}/\Sigma A$ зі зменшенням прозорості вод [14].

Висновки

На підставі аналізу натурних даних щодо первинної продукції фітопланктону та деструкції органічної речовини у водоймах, створених на місці затоплених кар'єрів із видобутку піску та гранітів, встановлено особливості перебігу процесів фотосинтезу, їхньої часової динаміки; з'ясовано сукцесійний стан штучних водних екосистем за співвідношенням продукційно-деструкційних процесів.

Таблиця 4

Характеристика дихальних втрат фітопланктону штучних водойм, утворених на місці затоплених кар'єрів

Кар'єри	Чиста продукція		Дихання фітопланктону		
	мг O_2 /(дм ³ ·добу)	частка від A_{\max} , %	г O_2 /(м ² ·добу)	частка від ΣA , %	частка від ΣR , %
Богунський	1,70±0,16	51,4±0,3	0,21±0,04	7,0±0,6	27,3±2,1
Сонячне	1,65±0,25	49,9±1,1	0,24±0,04	5,6±0,3	7,3±0,6
Слобідський	3,42±0,36	49,4±0,2	0,50±0,03	7,8±0,3	11,7±1,9
Селецький	1,85±0,27	47,3±1,2	0,45±0,01	6,7±0,0	10,5±0,4
Соколовський	1,02±0,05	79,3±0,9	0,13±0,01	12,5±0,2	5,8±0,5
Морозівський	1,63±0,15	71,0±7,1	0,22±0,01	9,0±0,2	12,6±2,5
Цегельний	1,79±0,17	41,1±1,1	0,49±0,03	9,7±0,0	5,6±0,2

Показано, що високий рівень первинного продукування є найважливішим механізмом сукцесії фітопланктону водойм антропогенного походження, який обумовлює утворення органічної речовини і насичення води киснем, що впливає на фізико-хімічні властивості вод (зокрема, прозорість і рН), а отже й визначає умови життєдіяльності гідробіонтів.

Інтенсивний перебіг процесів первинного продукування у водоймах антропогенного походження забезпечується біогенним живленням, зокрема вмістом загального нітрогену, кольоровістю вод, інтенсивністю сонячної радіації (розраховані коефіцієнти кореляції між значеннями A_{max} і параметрами вод, які аналізувалися, сягали відповідно: $r = 0,77$, $r = 0,78$, $r = 0,33$; а з ΣA — $r = 0,73$, $r = 0,51$, $r = 0,31$). Біомаса фітопланктону має помірний вплив на інтегральну продукцію ($r = 0,51$).

Зростання інтенсивності фотосинтезу зумовлює не лише збільшення ефективності утилізації сонячної енергії ($r = 0,68$), а й зростання функціональної активності водоростей, про що свідчить достовірна кореляція між P/B -коефіцієнтами та A_{max} ($r = 0,40$). Тіснішим був зв'язок питомої продукції фітопланктону з інтегральною ($r = 0,84$).

На відміну від водосховищ і природних вод, у кар'єрах спостерігалась поява додаткових піків первинної продукції фітопланктону, що зумовлено змінами його структури.

Інтенсивність деструкційних процесів (R і ΣR) визначається кольоровістю вод (відповідно $r = 0,83$ і $r = 0,73$), вмістом розчиненого у воді кисню ($r = 0,55$ і $r = 0,54$), загального нітрогену ($r = 0,65$ і $r = 0,02$), а також рівнем рН ($r = 0,52$ і $r = 0,52$).

Розраховані індекси зрілості свідчать про те, що у досліджуваних водних екосистемах переважають «молоді» і «рівноважні» стани.

Список використаної літератури

1. Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Ленинград : Наука, 1983. 150 с.
2. Виноградов М.Е., Шушкина Э.А. Сукцессия планктонных сообществ. *Океанология*. 1983. Т. 23, № 4. С. 633—637.
3. ГОСТ 18826-73. Вода питьевая. Методы определения содержания нитратов. Москва : Изд-во стандартов, 1972. 6 с.
4. ГОСТ 4192-82. Вода питьевая. Метод определения минеральных азотсодержащих веществ. Москва : Изд-во стандартов, 1983. 13 с.
5. ДСТУ ISO 6878:2008. Якість води. Визначення фосфору. Спектрометричний метод із застосуванням амонію молібдату. Київ : Держспоживстандарт України. 2011. 6 с.
6. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / за ред. В.Д. Романенка. Київ : ЛОГОС, 2006. 408 с.
7. Минеева Н.М. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль : Принтхаус, 2009. 279 с.
8. Мінеральні ресурси України. Київ : Держ. інформ. геол. фонд України, 2014. 270 с.
9. Одум Ю. Экология. Москва : Мир, 1986. Т. 1. 328 с.
10. Попельницкая И.М. Оценка вклада составляющих планктонной биоты в общую деструкцию органического вещества планктона Красноярского водохранилища : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2007. 22 с.

11. Таблица актинометрических наблюдений, станция Борисполь. Киев : ЦГО, 2005—2019.
12. Таблица актинометрических наблюдений, станция Ковель. Киев : ЦГО, 2005—2019.
13. Трифонова И.С. Состав и продуктивность фитопланктона разнотипных озер Карельского перешейка. Ленинград : Наука, 1979. 168 с.
14. Шелюк Ю.С. Закономірності розвитку фітопланктону водних екосистем басейнів Прип'яті і Тетерева (Україна) : матеріали VIII з'їзду Гідроекол. тов-ва України, присвяченого 110-річчю заснування Дніпровської біологічної станції, 6—8 лист. 2019, м. Київ. Київ, 2019. С. 97—100.
15. Шелюк Ю.С. Фітопланктон різнотипних водних екосистем Полісся : автореф. дис. ... докт. біол. наук. Київ, 2020. 35 с.
16. Шелюк Ю., Щербак В., Козин Ю. Піонерні сукцесії фітопланктону водою антропогенного походження. *Наук. вісн. Східноєвроп. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Сер. Біологічні науки*. 2017. № 7 (356). С. 109—115.
17. Шмаков В.М. Гидролого-экологические аспекты режима солнечной энергии в водохранилищах днепровского каскада. Киев : Наук. думка, 1988. 167 с.
18. Bodeux S., Pujades E., Orban P. et al. Interactions between groundwater and the cavity of an old slate mine used as lower reservoir of an UPSH (Underground Pumped Storage Hydroelectricity): A modelling approach. *Engineering Geology*. 2017. 2. P. 71—80.
19. Conklin Lawrence H. Kingsbridge: An Early Quarrying District on Manhattan Island [New York]. *Mineralogical Record*. 1997. Vol. 28, N 6. P. 457—473.
20. Eberts S.M., Bair E.S. Simulated Effects of Quarry Dewatering Near a Municipal Well Field. *Groundwater*. 1990. 28, 1. P. 37—47.
21. Loess in China and Europe — A Tribute to Edward Derbyshire / Ed. by Slobodan B. Marković, Shiling Yang, Norm Catto and Thomas Stevens. *Quaternary International*. 2014. P. 334—335.
22. Poulain A., Pujades E., Goderniaux P. Hydrodynamical and Hydrochemical Assessment of Pumped-Storage Hydropower (PSH) Using an Open Pit: The Case of Obourg Chalk Quarry in Belgium. *Applied Sciences*. 2021, 11. P. 4913.
23. Pujades E., Willems T., Bodeux S. et al. Underground pumped storage hydroelectricity using abandoned works (deep mines or open pits) and the impact on groundwater flow. *Hydrogeol. J.* 2016. Vol. 24, N 6. P. 1531—1546.
24. Reynolds C.S. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge, London, New York et al. : Cambridge University Press, 1984. 384 p.
25. Shelyuk Yu.S. Comparative assessment of the methods of determining phytoplankton production in water bodies differing in their trophic status and water velocity. *Hydrobiol. J.* 2017. Vol. 53, N 6. P. 37—48.
26. Shelyuk Yu.S. Regularities of primary production formation in river ecosystems (the basins of the Pripyat' and Teterev Rivers, Ukraine). *Ibid.* 2019. Vol. 55, N 4. P. 38—54.
27. Shelyuk Yu.S. Formation of energy fluxes in small reservoirs. *Ibid.* 2020. Vol. 56, N 2. P. 17—32.
28. Tilzer M.M. Estimation of phytoplankton loss rates from daily photosynthetic rates and observed biomass changes in Lake Constance. *J. Planlton Res.* 1984. Vol. 6, N 2. P. 309—324.
29. Westlake D.F., Adams M.S., Bindloss M.E. et al. Primary production. The functioning of freshwater ecosystems. Cambridge : Univ. Press, 1980. P. 141—246.

Надійшла 02.09.2021

Yu.S. Shelyuk, D. Sc. (Biol.), Professor,
Zhytomyr Ivan Franko State University,
40 Velyka Berdychivska St., Zhytomyr, 10008, Ukraine,
e-mail: Shelyuk_Yulya@ukr.net
ORCID 0000-0001-6429-1028

PECULIARITIES OF PRODUCTION AND DESTRUCTION PROCESSES IN
ARTIFICIALLY CREATED AQUATIC ECOSYSTEMS

The influence of environmental factors on the peculiarities of the process of primary production in reservoirs, which were formed on the site of flooded quarries for the extraction of minerals, has been studied. It is established that a high level of primary production is the most important mechanism of phytoplankton succession of reservoirs of anthropogenic origin, which causes the formation of organic matter and oxygen saturation of water, which affects the physicochemical properties of water. It is shown that the studied aquatic ecosystems are dominated by «young» and «equilibrium» states.

Keywords: *primary production, phytoplankton, destruction of organic matter, quarries.*