

УДК 519.237.5

АНАЛІЗ ЗАЛЕЖНОСТІ ВМІСТУ ХЛОРОФІЛУ А У ФІТОПЛАНКТОНІ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ВІД СУКУПНОЇ ДІЇ ФАКТОРІВ ЗАСОБАМИ МНОЖИННОЇ РЕГРЕСІЇ

А.В. Курейшевич¹, Г.А. Піднебесна², В.С. Степашко²

¹ Інститут гідробіології НАН України,

² Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України

alischuk@rambler.ru, pidnebesna@ukr.net, stepashko@irtc.org.ua

В роботі досліджується вплив різних природних і антропогенних чинників на вміст хлорофілу *a* – основного фотосинтезуючого пігменту фітопланктону, який є показником інтенсивності його вегетації та рівня первинної продукції. Дослідження проведено за допомогою множинного регресійного аналізу даних Каховського водосховища.

Ключові слова: вміст хлорофілу, фітопланктон, регресійний аналіз, Каховське водосховище

The paper studies the impact of various natural and anthropogenic factors on the content of chlorophyll *a* being the main photosynthetic pigment of phytoplankton, which is a measure of intensity its vegetation and level of primary production. The study was conducted using multiple regression analysis of Kakhovka reservoir data.

Keywords: chlorophyll content, phytoplankton, regression analysis, Kakhovka reservoir

В работе исследуется влияние различных природных и антропогенных факторов на содержание хлорофилла *a* – основного фотосинтезирующего пигмента фитопланктона, который является показателем интенсивности его вегетации и уровня первичной продукции. Исследование проведено с помощью множественного регрессионного анализа данных Каховского водохранилища.

Ключевые слова: содержание хлорофилла, фитопланктон, регрессионный анализ, Каховское водохранилище

Вступ

Вивчення закономірностей функціонування водних екосистем і формування їх біологічної продуктивності та якості води в умовах зростаючого евтрофування і забруднення – актуальне завдання сучасної екології.

Високий рівень антропогенного навантаження на водні об'єкти України обумовлений великою щільністю населення, впливом промисловості, сільського господарства, а також недостатньо ефективною системою очищення стічних вод, що надходять у водойми. У зв'язку з цим виникає необхідність з'ясування відгуку планктонних водоростей на зміни навколишнього середовища. Дослідження фундаментальних основ формування фітопланктону і глобального впливу природних чинників на цей процес в умовах антропогенного навантаження важливі для розробки теорії біологічної продуктивності водойм, науково обґрунтованих методів управління функціонуванням екосистем і прогнозування якості води.

Постановка задачі

Реакцію планктонних водоростей на дію природних і антропогенних чинників можна досліджувати за вмістом хлорофілу a – основного фотосинтезуючого пігмента фітопланктону, оскільки він є показником рівня його вегетації та первинної продукції. За концентрацією хлорофілу a в одиниці об'єму води судять також про ступінь трофності водойм, їх екологічний стан і біомасу планктонних водоростей.

У дніпровських водосховищах у літній сезон спостерігається прямий зв'язок між багаторічною динамікою середніх величин вмісту хлорофілу a і біомасою фітопланктону [1]. Цей зв'язок найбільш чітко проявляється в найбільших водосховищах Дніпра, що регулюють його стік, зокрема, в Київському, Кременчуцькому та Каховському.

Як відомо, вміст хлорофілу a фітопланктону в одиниці об'єму води залежить від багатьох чинників: гідрологічних та гідрометеорологічних умов, світлового та температурного режимів, сезону року, часу доби, видового складу водоростей, їх забезпеченості біогенними елементами, фізіологічного стану популяцій [2, 3].

Як правило, в більшості наукових публікацій розраховують парні кореляції між вмістом хлорофілу a і певними чинниками середовища. Однак однофакторний аналіз, на жаль, мало інформативний, особливо за низьких значень коефіцієнтів кореляції.

Тому ця робота має на меті розрахувати множинні кореляційні залежності на основі побудови множинних регресій для одного з водосховищ Дніпра (Каховського), що показують залежність вмісту хлорофілу a фітопланктону від таких чинників:

- x_1 – сумарний вміст розчиненого неорганічного азоту, мг N / л (фактор 1);
- x_2 – вміст розчиненого неорганічного фосфору, мг P / л (фактор 2);
- x_3 – N/P – відношення вмісту азоту до вмісту фосфору, відносні одиниці (фактор 3);
- x_4 – температура води, $t^{\circ}\text{C}$ (фактор 4);
- x_5 – об'єм стоку води, $\text{м}^3 \times 10^9$ / місяць (фактор 5);
- x_6 – сумарна сонячна радіація, МДж / $\text{м}^2 \times \text{місяць}$ (фактор 6).

Опис дослідження

Регресійний аналіз дає можливість виявити залежність між факторними (незалежними) та результативними (залежними) показниками. Проте він не виявляє зв'язки, які лежать в основі цих залежностей.

Показник *множинний R* (коефіцієнт кореляції) відображає ступінь залежності (тісноту) незалежних змінних (факторних показників) X та залежної змінної Y . Розраховується як корінь квадратний з *коефіцієнта детермінації* (R^2).

квадрат, R^2 або міра визначеності), який характеризує якість отриманої регресійної моделі. Вимірюється в межах [0, 1].

Якщо значення R наближається до 1, це означає, що побудована модель пояснює майже всю мінливість відповідних змінних, і навпаки – наближення цього значення до нуля говорить про погану якість моделі (таблиця 1):

Таблиця 1

Коефіцієнт кореляції	Тіснота зв'язку
1	Зв'язок функціональний
0,9 – 0,99	Дуже сильний
0,7 – 0,89	Сильний
0,5 – 0,69	Значний
0,3 – 0,49	Помірний
0,1 – 0,29	Слабкий
0	Зв'язок відсутній

Адекватними вважаються моделі, коефіцієнт детермінації яких більше ніж 0,5. Розрахунки проводились за допомогою засобу «Регресія» надбудови «Аналіз даних» програми MS Excel.

У процесі дослідження було побудовано регресійні моделі з різною кількістю факторів (від 1 до 6) за статистичними даними за 1980-93 роки (таблиця 2) і розраховано для них коефіцієнти кореляції та детермінації.

Таблиця 2

№ п/п	Рік (серпень місяць)	Маса хлорофілу a в планктоні, мкг/л	Мінеральна форма N , мг/л	Мінеральна форма P , мг/л	N/P	Температура води t , °C	Стік, $m^3 \times 10^9$ / місяць	Освітленість, МДж/м ² × місяць
		Y	x1	x2				
1	1980	58,1	3,224	0,065	49,60	19,4	5,080	552,7
2	1981	27,4	1,2312	0,076	16,20	21,1	3,200	703,8
3	1982	16,3	1,3108	0,058	22,60	24,0	4,570	620,7
4	1983	41,4	1,4348	0,068	21,10	21,0	2,540	606,8
5	1984	14,1	0,617	0,095	6,49	21,4	3,390	673,3
6	1985	47,8	1,065	0,036	29,58	23,5	4,620	645,1
7	1986	29,1	1,156	0,027	42,81	23,4	4,150	497,9
8	1987	17,7	0,081	0,026	3,12	20,8	2,830	724,3
9	1988	19,5	0,291	0,094	3,10	23,4	3,570	653,0
10	1989	11,09	0,406	0,026	15,62	22,7	4,260	753,0
11	1990	9,8	0,369	0,030	12,30	21,0	2,950	750,0
12	1991	17,9	0,578	0,123	4,70	21,0	3,360	693,0
13	1993	14,3	0,438	0,111	3,95	22,9	2,840	625,0

З кожної групи моделей з однаковою кількістю факторів для подальшого аналізу вибиралась лише одна модель з найбільшим значенням коефіцієнта множинної кореляції R (таблиця 3). З цієї таблиці видно, що чотири моделі з кількістю факторів 4 й більше мають однакове значення $R = 0,8390$.

Таблиця 3

Структура	Модель	R
$y=f(x_1)$	$10,6171+15,28*x_1$	0,8209
$y=f(x_1,x_3)$	$9,8566+11,6042*x_1+0,2370*x_3$	0,8312
$y=f(x_1,x_3,x_5)$	$18,6941+11,4715*x_1+0,3549*x_3-0,0132*x_5$	0,8387
$y=f(x_1,x_3,x_5,x_6)$	$23,0511+11,4097*x_1+0,3297*x_3-2,8388*x_5-0,0066*x_6$	0,8390
$y=f(x_1,x_3,x_4,x_5,x_6)$	$27,0135+11,1381*x_1+0,3283*x_3-0,1436*x_4-2,6635*x_5-0,0084*x_6$	0,8390
$y=f(x_1,x_2,x_3,x_5,x_6)$	$25,0796+11,7226*x_1-7,3318*x_2+0,2979*x_3-2,7719*x_5-0,0089*x_6$	0,8390
$y=f(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6)$	$29,5322+11,4512*x_1-7,8807*x_2+0,2940*x_3-0,1559*x_4-2,5766*x_5-0,0111*x_6$	0,8390

Аналіз отриманих результатів показує, що в усі без винятку відібрані моделі обов'язково входить змінна x_1 – мінеральна форма азоту. Отже, що найважливішим чинником, який впливав на вміст хлорофілу a у фітопланктоні Каховського водосховища в літній сезон (у серпні, що характеризується інтенсивним «цвітінням» води синьозеленими водоростями), є саме x_1 . Це закономірно, враховуючи, що при евтрофуванні водойм вміст фосфору у воді зростає швидше, ніж азоту, і він (азот) стає тим чинником, що лімітує розвиток фітопланктону, що спостерігалось у водосховищах Дніпра (і найбільш чітко у Каховському, яке замикає каскад дніпровських водосховищ) у 1980-90 рр. [4].

Значущість інших чинників у порядку зменшення така: фактор x_3 (відношення вмісту азоту до фосфору – N/P); фактор x_6 (сумарна сонячна радіація); фактор x_5 (стік води, причому його вплив строго негативний); фактор x_4 (температура).

Показник x_2 (вміст мінеральної форми фосфору) виявився найменш значущим у порівнянні з іншими досліджуваними нами чинниками для вегетації літнього фітопланктону в цьому водосховищі, бо вміст розчиненого неорганічного фосфору у воді цього водного об'єкта дуже високий. Його величини характерні для евтрофних водойм [5] і, на відміну від азоту, у 1980-90 роках не лімітували розвиток планктонних водоростей [4].

Слабкий зв'язок вмісту хлорофілу a в одиниці об'єму води Каховського водосховища у літній сезон виявився також з фактором x_4 – температурою води. Причиною цього є те, що її показники у липні-серпні досліджуваних років змінювалися не суттєво (від 19,4 до 24°C, тобто лише на 4,6°C).

У випадку аналізу дії двох чинників найбільш тісний зв'язок вмісту хлорофілу виявлено з факторами x_1 та x_3 (концентрація азоту і відношення N/P), x_1 та x_6 (концентрація азоту і сумарна сонячна радіація) та x_1 та x_2 (концентрація азоту та фосфору). Слабкий зв'язок відзначено для пари чинників x_2 та x_4 (концентрація фосфору і температура води). Це зрозуміло, бо фосфор не лімітував розвиток літнього фітопланктону, а температура води змінювалася в невеликих межах.

Звертає на себе увагу також той факт, що зі збільшенням кількості чинників у множинній регресії значення коефіцієнтів детермінації та множинної кореляції збільшуються. Це є прямим наслідком відомої властивості побудови регресійних залежностей – збільшення складності моделі (кількості враховуваних факторів) зменшує середньоквадратичну помилку апроксимації.

За врахування трьох чинників найвище значення коефіцієнта множинної кореляції ($R=0,8387$) відмічено для моделі $y=f(x_1, x_3, x_5)$, де x_1 , x_3 та x_5 – концентрація азоту, відношення N/P та стік води, відповідно.

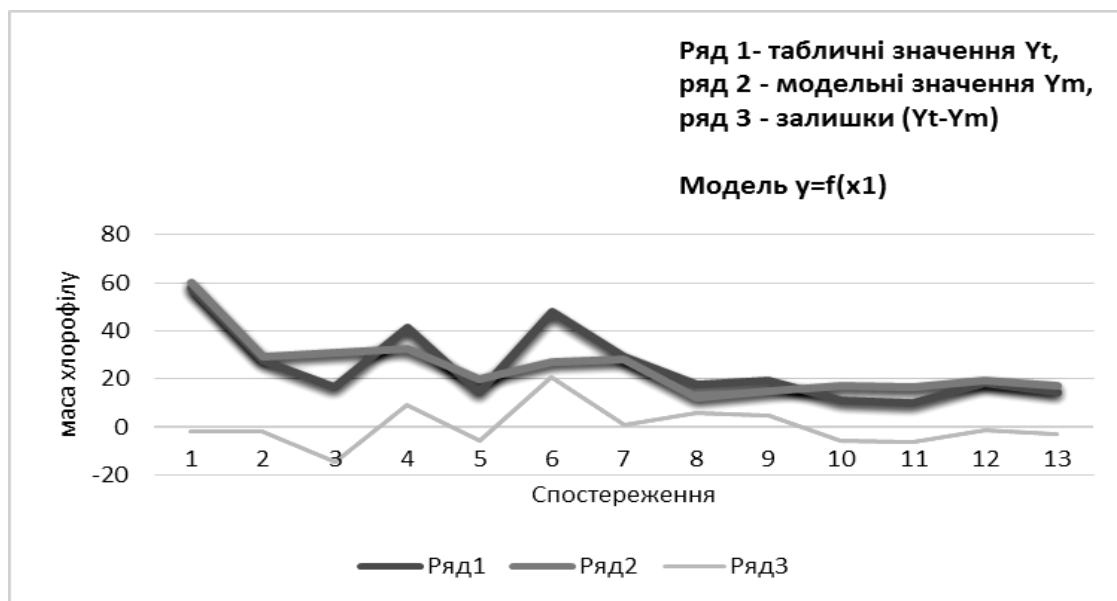
За врахування 4-х чинників найкращою ($R=0,8390$) є модель $y=f(x_1, x_3, x_5, x_6)$, де x_1 , x_3 , x_5 , x_6 – концентрація азоту, відношення N/P, стік води та сумарна сонячна радіація, відповідно.

Для 5-и чинників однакову кореляцію ($R=0,8390$) мали моделі $y=f(x_1, x_3, x_4, x_5, x_6)$ – без концентрації фосфору та $y=f(x_1, x_2, x_3, x_5, x_6)$ – без температури. За дії усіх 6-и чинників коефіцієнт кореляції та детермінації був таким же, як і за комбінованої дії вказаних варіантів чотирьох і п'яти факторів.

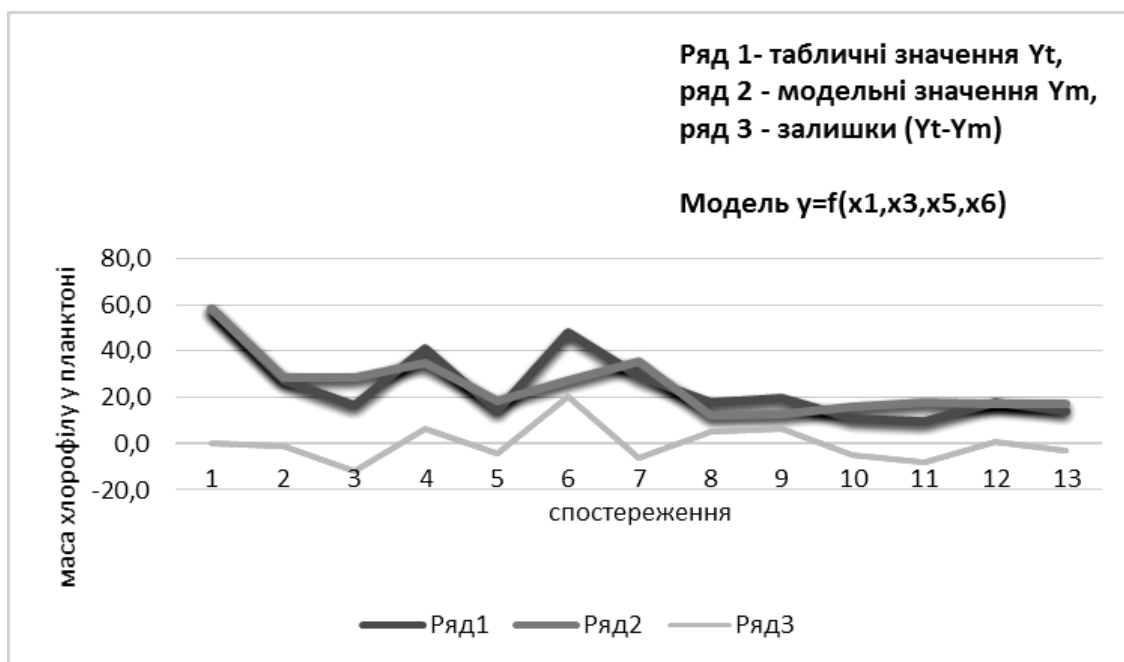
Таким чином, 4 моделі мали однакові значення коефіцієнта множинної кореляції $R=0,8390$. Це означає, що абсолютно достатнім є використання моделі лише з чотирма чинниками, тобто подальше збільшення кількості враховуваних факторів буде означати зайве переускладнення моделі.

На рис.1 показано табличні значення вмісту хлорофілу a у планктоні, її значення для отриманих моделей та їхню різницю (залишки) для моделей вигляду $y=f(x_1)$ (рис.1, а) та $y=f(x_1, x_3, x_5, x_6)$ (рис.1, б).

Візуальна подібність цих двох графіків свідчить про те, що показник x_1 , тобто концентрація азоту, насправді є визначальним, найбільш інформативним фактором, від якого насамперед залежить вміст хлорофілу a в одиниці об'єму води Каховського водосховища.



а



б

Рис.1 Порівняльні графіки табличних і модельних значень маси хлорофілу *a* у планктоні та їхніх різниць (залишків) для моделей з одним (а) і чотирма (б) факторами

Слід наголосити, що все сказане стосується саме цього водосховища, яке замикає каскад дніпровських водосховищ, наявної вибірки статистичних даних та літнього сезону, що характеризується інтенсивним «цвітінням» води синьозеленими водоростями.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз парних кореляцій між вмістом хлорофілу *a* в одиниці об'єму води у літній сезон в Каховському водосховищі та низкою чинників (концентрація неорганічного розчиненого азоту та фосфору, відношення N/P, температура води, стік води через турбіни ГЕС, сумарна сонячна радіація) у 1980–90 роки свідчить, що найбільш тісний зв'язок вказаного показника спостерігався з концентрацією азоту, найменш тісний – з концентрацією фосфору. Це закономірно, оскільки азот у цьому водосховищі лімітує розвиток синьозелених водоростей, а фосфор, навпаки, знаходиться у надлишку.

2. У множинних регресіях з двома факторами найбільш наближені моделі встановлено для зв'язку вмісту хлорофілу *a* з такими чинниками: концентрація азоту і відношення N/P, концентрація азоту та сумарна сонячна радіація і концентрація азоту та фосфору.

3. Зі збільшенням кількості чинників у множинних регресіях спостерігається підвищення коефіцієнтів детермінації та множинної кореляції між досліджуваними показниками. Однак коефіцієнти множинної кореляції та детермінації в моделях за умов дії шести факторів не перевищують вказані показники в найкращих моделях з чотирма та п'ятьма факторами. Це означає, що для Каховського водосховища абсолютно достатнім є використання моделі з чотирма чинниками, тобто $y=f(x_1, x_3, x_5, x_6)$, де x_1, x_3, x_5, x_6 – концентрація азоту у воді, відношення концентрацій азоту та фосфору (N/P), стік води через турбіни ГЕС та сумарна сонячна радіація, відповідно.

Література

1. Коппа Ю.В., Курейшевич А.В., Пахомова М.Н. Моделирование зависимости биомассы фитопланктона от содержания хлорофилла *a* // Журн. Автоматика, 1984. – № 1. – С. 57–61.
2. Курейшевич А.В. Пигменты фитопланктона и факторы, влияющие на их содержание в водоеме (на примере днепровских водохранилищ): Автореф. дис. канд. биол. наук. – Киев: Ин-т гидробиологии АН УССР, 1983. – 23 с.
3. Минеева Н.М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. – М.: Наука, 2004. – 156 с.
4. Курейшевич А.В., Журавлева Л.Н. Связь между содержанием хлорофилла *a* и концентрацией биогенных веществ в воде днепровских водохранилищ // Гидробиол. журн. – 1997. – Т. 33, № 1. – С.75–83.
5. Likens J.E. Primary production of Inland aquatic ecosystems // Primary productivity of the biosphere. – В. etc.: Springer, 1975. – P. 185–202.