

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ВОДНОЇ ЕКОСИСТЕМИ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ СТЕХІОМЕТРІЇ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПІДХОДУ

Андрєєв В.І., Случак О.І., Случак О.І., Алексєєва А.О., Крисінська Д.О.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

68 Десантників, 10, 54000, м. Миколаїв

avi@chmnu.edu.ua, slu4ok@gmail.com, ill69mill@gmail.com,

anna.aleksyeyeva@chmnu.edu.ua, d_krysinska@chmnu.edu.ua

Авторами статті представлено розробку методики моделювання стану харчового ланцюга водної екосистеми в аспекті приросту біомаси продуцентів за екологічною енергетичною стехіометрією. В основі дослідження лежить ряд функцій-синусоїд, розроблених в ході моделювання помісячного надходження сонячної енергії на одиницю площі за широтою. Середній прогнозний показник надходження енергії для півдня України 2518 МДж/м² дуже близький до результатів аналогічних прикладних вимірювань в м. Одеса. Для моделювання розраховано середню широту для України 48°23', середні схилання сонця для кожного з 8 місяців за астрономічним календарем (близько 14), а також середні тривалості сонячного дня та визначені на основі цих даних кут падіння та відбиття сонячних променів на воду з урахуванням не тільки кута падіння опівдні, а й зміни протягом дня (кут відбиття коливається в межах 17,5 в Червні до 29,26 в Вересні). Виведено поправочні коефіцієнти для широтності, розраховано відсоткове відношення днів з циклональною погодою, через які виникає зростання відбиття через хмарність та хвили – 638 годин та 30 хв. Розраховано ККД фотосинтезу для основних груп фітопланктонних організмів, що становить 1,98% для Chlorophyta, 2,38% для Cyanophyta, 1,96 для Euglenophyta та 1,65% попередньо для всіх інших. Загальне середнє ККД фотосинтезу таким чином становило 1,83%. З урахуванням площі водного дзеркала, надходження енергії, відбиття, розсіювання та поглинання. Враховуючи ККД фотосинтезу здійснено стехіометричне моделювання приросту біомаси продуцентів. Отримано потенціал депонування вуглекислого газу 2,6 кг/м² на рік, виділення кисню 1,92 кг/м², приросту біомаси 1,8 кг/м². Це максимальний потенціал. Дослідження доповнено виведеними поправочними коефіцієнтами на основі енергетичного та токсикологічного індексів екологічної безпеки, ORP та співвідношення Редфілда. Це дає реальну сумарну енергію на метр квадратний в 12335,66473 кДж, приріст біомаси 773,1266184 г/м². Прогнозна модель дає 577,6 кг/га на рік риби, що є близьким до значення природної біопродуктивності для рослиноїдних риб (505 кг/га). На етапі аналізу харчового ланцюга пропонується додатково використовувати виведену закономірність впливу солоності на ріст макролітів та поправочні коефіцієнти рибопродуктивності для різних ґрунтів. Закладено основу для автоматизації та локального моделювання. *Ключові слова:* екологічна стехіометрія, моделювання біоценозів, ККД фотосинтезу, альbedo водойм, енергетика водної екосистеми, біопродуктивність риб.

Development of a methodology for modeling the state of the water ecosystem based on the methods of ecological stoichiometry, taking into account the energy approach. Andreev V., Sluchak O., Sluchak O., Alekseeva A., Krysinska D.

The article develops a methodology for modeling the state of the food chain of the aquatic ecosystem in terms of biomass growth of producers based on ecological energy stoichiometry. The research is based on a number of sinusoidal functions developed during the simulation of the monthly solar energy arrival per unit area by latitude. The average forecast indicator of energy input for southern Ukraine of 2518 MJ/m² is very close to the results of similar applied measurements in Odesa. For modeling, the average latitude for Ukraine is 48°23', the average inclinations of the sun for each of the 8 months according to the astronomical calendar (about 14), as well as the average duration of a sunny day, and the angle of incidence and reflection of the sun's rays on water are determined based on them, taking into account only the angle of incidence at noon, and changes during the day (the angle of reflection ranges from 17.5 in June to 29.26 in September). Correction coefficients for latitude were derived, the percentage ratio of days with cyclonic weather, due to which there is an increase in reflection due to cloudiness and waves, was calculated – 638 hours and 30 minutes. The efficiency of photosynthesis for the main groups of phytoplankton organisms was calculated, which is 1.98% for Chlorophyta, 2.38% for Cyanophyta, 1.96% for Euglenophyta and 1.65% for all others. The overall average efficiency of photosynthesis was thus 1.83%. Taking into account the area of the water mirror, the arrival of energy, reflection, scattering and absorption. Taking into account the efficiency of photosynthesis, a stoichiometric simulation of the increase in biomass of producers was carried out. The potential of carbon dioxide deposition is 2.6 kg/m² per year, oxygen release is 1.92 kg/m², and biomass growth is 1.8 kg/m². This is the maximum potential. The study is supplemented by derived correction factors based on energy and toxicological indices of environmental safety, ORP and the Redfield ratio. This gives a real total energy per square meter of 12335.66473 kJ, biomass growth of 773.1266184 g/m². The predictive model yields 577.6 kg/ha per year of fish, which is close to the value of natural bioproductivity for herbivorous fish (505 kg/ha). At the stage of food chain analysis, it is proposed to additionally use the deduced regularity of the effect of salinity on the growth of macroliths and correction coefficients of fish productivity for different soils. The basis for automation and local modeling is laid. *Key words:* ecological stoichiometry, modeling of biocenoses, efficiency of photosynthesis, albedo of water bodies, energetics of water ecosystem, bioproductivity of fish.

Постановка проблеми. Проблема оцінювання стану харчового ланцюга водних біоценозів є особливо актуальною в аспектах оцінки безпечних лімітів відбору приросту біоресурсів, потенціалу депонування вуглецю та можливостей асиміляції забрудників водною екосистемою. Загалом подібні дослідження базуються на методах ловів та біоіндикації за шкалами сапробності, трофністю та рядом інших ознак.

Основною складністю в даному випадку є фрагментарність отримуваних даних, що вимагає створення чіткої прогнозової моделі та корегування господарювання в межах її показників.

Одним з відносно новітніх підходів в даному напрямку стала екологічна стехіометрія [1]. Особливо актуальною її зробило зосередження зусиль на депонуванні вуглецю, монетизація якого дозволила провести чітку фінансову оцінку витрат на даний напрям діяльності людини (або оцінку екосистемної послуги такого типу) [2].

В даному дослідженні екологічна стехіометрія тісно переплітається з екологічною енергетикою – значно більш розвинутою, ще з 1800-х років наукою [3], так як реакція фотосинтезу, на якій базується асиміляція енергії сонця та депонування вуглецю, дозволяє робити чіткі оціночні прогнози потенційної вигоди від діяльності природних екосистем.

Крім того, на основі розробленої моделі передачі енергії харчовим ланцюгом, можна встановлювати безпечні ліміти відбору біоресурсів та оцінювати вплив таких виловів на екосистему на основі даних по погодним умовам.

Метою даного дослідження стала розробка методики комплексного моделювання стану водної екосистеми на основі методів екологічної стехіометрії, з урахуванням енергетичного підходу.

Відповідно, об'єктом даного дослідження є міграція енергії харчовим ланцюгом водних екосистем, в рамках моделі, розробленої на базі екологічної стехіометрії.

Предметом дослідження виступає екостехіометрично-енергетична модель водних біоценозів України, з урахуванням лімітуючих факторів, включаючи аварійні.

Основні завдання дослідження:

- розробити модель надходження прямої енергії сонячного випромінювання на водне дзеркало водойми з урахуванням: прямої сонячної радіації в певну пору року; хмарності, кута падіння та відбиття, хвилювання, тривалості сонячного дня, площі водного дзеркала, прозорості води;

- на основі формули фотосинтезу вивести формулу для розрахунку реально використаної сонячної енергії без урахування ККД фотосинтезу;

- на основі літературних даних про дослідження водної біоти України визначити: концентрації основних таксонів фітопланктону у відсотковому співвідношенні та знайти дані про їх біопродуктив-

ність, біопродуктивність зоопланктонних організмів (також за групами), біопродуктивність та потребу в кормах трав'яних та всеїдних риб, на основі яких вивести ККД використання сонячної енергії на різних рівнях харчової піраміди;

- вдосконалити модель водних біоценозів за допомогою лімітуючих факторів: активність риб за прогнозами клювання риби (вплив погоди), санітарний пропуск та швидкість течії для проточних водойм, сапробність та трофність водойми;

- створити підґрунтя для доповнення моделі за рахунок концепції водойми як відкритої системи (надходження енергії з зовнішніх екосистем разом з поживними речовинами, харчування водоплаваючої птиці, змиви гранту дощами, виніс біомаси людиною та ін).

Актуальність дослідження. В умовах значного антропогенного забруднення водних екосистем, що ускладнюється аварійними скидами та витоками шкідливих речовин внаслідок пошкодження критичної інфраструктури, спричиненого військовими діями, особливої актуальності набувають напрямки розробки та цифровізації комплексної моделі харчових ланцюгів водних біоценозів, яка б дозволила оцінити нанесену екосистемі шкоду, для включення компенсації по даному аспекту до загальної суми репарацій та розробки заходів з рекультивації постраждалої території.

Дане дослідження присвячено розробці методики моделювання стану водної екосистеми на основі методів екологічної стехіометрії з ухилом в бік міграції енергії харчовим ланцюгом.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження проводилось на базі науково-дослідної частини та кафедри екології Чорноморського національного університету імені Петра Могили в рамках теми «Науково-практичне обґрунтування та визначення стенобіонтного підходу щодо забезпечення національної екологічної безпеки водних екосистем України» (№ держреєстрації 0120U101959).

Робота спрямована на вирішення завдань, визначених Урядом України у сфері зміцнення екологічної безпеки України та Законом України, а саме:

- Законом України «Про Пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» № 3715-VI (Пріоритет 6: широке застосування технологій більш чистого виробництва та охорони навколишнього природного середовища);

- Законом України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» від 28.02.2019 № 2697-VIII та постановою Кабінету Міністрів України від 18 травня 2017 року №336 «Про затвердження Порядку розроблення плану заходів управління річковим басейном».

- Основні засади дослідження визначено пунктами Водної Рамкової Директиви ЄС 2000/60/ЄС.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження в напрямку екологічної стехіометрії поверхневих вод, в основному базуються на CNP-підході, тобто обчисленні біодоступності карбону, нітрогену та фосфору для первинної ланки продуцентів [4; 5]. Рідше [6] приділяється увага бактеріальним угрупованням редуцентів та анаеробних продуцентів.

При цьому часто відмічається два основні фактори – сезонна динаміка [7] та антропогенний вплив [8].

Відповідно, в ході формування моделей [9] трофічних ланцюгів для водних екосистем формується модель фонових значень (зазвичай на основі вмісту нітратів, нітритів, фосфатів), що є природним для даних умов та антропогенного навантаження.

Основним джерелом надходження енергії до річкової екосистеми є сонячне випромінювання, поглинуте в ході фотосинтезу. Автори [10] наводять таблицю з середніми показниками активної фотосинтетичної радіації на квадратний метр за періоди 1961–1970, 1971–1980, 1981–1990, 1991–2000, 2001–2006 та хронологією її зміни, в інформаційному джерелі [11] здійснюють районування за показниками геліоресурсів.

Проте, лише в першій з них є аналітика по порам року, і лише для пунктів вимірювання, проте цієї інформації недостатньо для повноцінного моделювання. В даному аспекті формула, яку наводять автори [12] дає змогу дещо краще зрозуміти особливості помісячного розподілу енергії сонячного випромінювання.

Все це корелює з моделями, виведеними нами [13] на основі таблиці помісячних вимірювань прямої сонячної радіації в різних широтах для кожного з місяців [14]. Так було отримано сумарне надходження енергії на м^2 в районі 2518 МДж/м^2 для Миколаївщини та півдня України, в той час як середній показник з таблиці джерела [10] для Одеси – 2510 МДж/м^2 .

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим, присвячується означена стаття. Дана стаття присвячується вирішенню питань моделювання річного приросту біомаси на основі надходження сонячної енергії в рамках проблеми екологічної стехіометрії в харчовому ланцюзі водного біоценозу, CNP-стехіометрія також розглядається в рамках лімітуючих умов росту фітопланктону за закономірністю Редфілда [15].

Новизна дослідження базується на інноваційній концепції енергетичної стехіометрії, що закладає базу для автоматизації моделювання приростів біоресурсів прісних (а за певних корегувань і солоних) водойм для встановлення лімітів вилову, та визначення їх потенційної здатності до депонування вуглецю. Використання погодних факторів, показників надходження сонячної енергії, що можуть вимірюватись люксометрами, та лімітуючих факторів, які також підлягають моніторингу, робить модель динамічною та дозволяє не тільки прогнозувати можли-

вості біоценозу в тривалій перспективі, а й оцінювати її в реальному часі, встановлюючи відповідні риболовні обмеження, проводячи рекультиваційні заходи та оцінюючи завдану їй шкоду.

Методологічне та загальнонаукове значення. Екоенергетична стехіометрія водойм є перспективним напрямком для отримання детальної, науково обґрунтованої інформації про функціонування харчових ланцюгів водних екосистем. Результати дослідження можна використовувати в процесі навчання студентів та аспірантів екологічних спеціальностей, для кращого розуміння особливостей формування складних динамічних моделей екосистем.

З наукової точки зору, моделі такого рівня – це запит на контроль над природною екосистемою, тобто розуміння принципів її функціонування на рівні всієї системи та окремого організму, окрім того, це важливе доповнення до системи моніторингу реального часу, крок до майбутніх заходів з локального коригування нанесеної антропогенним впливом шкоди екологічним системам.

Виклад основного матеріалу. Розроблена авторами методика включає таку послідовність дій:

1. Визначення площі водного дзеркала та об'єму водойми.
2. Визначення річного надходження прямої сонячної радіації на метр квадратний площі на основі закономірностей, виведених для кожного з місяців вегетаційного періоду за тривалістю світлового дня (без урахування біологічної зими).
3. Коригування показників по отриманій середовищі енергії на основі даних про кількість днів з циклонною погодою (впливає на хмарність, хвилювання), прозорість води (якщо менше метра), зміни кута падіння сонячних променів протягом дня (за схиленням).
4. Визначення відсоткового складу фітопланктонної біомаси по відділам з розрахунком ККД фотосинтезу для кожного з них та обсягів потенційного депонування вуглецю, виділення кисню, фітоекстракції забрудників та нарощування біомаси.
5. Корегування вказаних показників за допомогою коефіцієнтів, що визначають лімітуючі фактори: санітарний стік, ORP, співвідношення Редфілда, рівень забрудненості за індексом сапробності.
6. Розрахунок проходження енергії харчовим ланцюгом з урахуванням норм кормів та посадки для аквакультури та визначення безпечних лімітів відбору біоресурсів з урахуванням плодючості визначених видів.

Вимірювання площі водойми можна реалізувати шляхом обведення водойми в середовищі Google Maps (не можна зберігати, тому великі об'єкти обводити не рекомендуємо), Google Earth, або векторизувати карту в середовищі Mapinfo. По ряду штучних водойм та озер дані про площі водного дзеркала є в довідниках [16], а по річках таких вимірювань окремо не проводиться, враховуючи складність іден-

тифікації приток. Маючи дані про площу, середню глибину та довжину річки, можемо розрахувати її приблизний об'єм за методикою [17]. По штучним водоймам дані про об'єм є в тих же довідниках.

Було створено прогнозну модель приходу енергії сонячного випромінювання на площу біля поверхні

землі питому енергію сонячного випромінювання для визначених координат [13].

Отримані синусоїди (таблиця 1) відрізняються між собою коефіцієнтами та коефіцієнтом кореляції показників, але мають досить високу для використання в прогнозах репрезентативність.

Таблиця 1

Функції приходу енергії сонця на метр квадратний площі

№	Функція	R
1	$E = 121.77 + 144.08 \cdot \cos(0.032 \cdot L - 0.283)$,	0,9994
2	$E = 174.44 + 99.04 \cdot \cos(0.037 \cdot L - 0.8099)$,	0,9991
3	$E = 239.595 + 45.788 \cdot \cos(0.055 \cdot L - 1.774)$,	0,9976
4	$E = 244.243 + 41.52 \cdot \cos(0.058 \cdot L - 1.957)$,	0,9956
5	$E = 191.744 + 81.367 \cdot \cos(0.041 \cdot L - 1.029)$,	0,9956
6	$E = 123.396 + 139.727 \cdot \cos(0.032 \cdot L - 0.433)$,	0,9997
7	$E = 102.213 + 160.82 \cdot \cos(0.029 \cdot L - 0.9385)$,	0,9997
8	$E = 129.195 + 133.909 \cdot \cos(0.036 \cdot L - 0.3826)$,	0,9998

де E (Energy) – енергія, що надходить до екосистеми на 1 м^2 за годину; L (Latitude) – широта в північній півкулі.

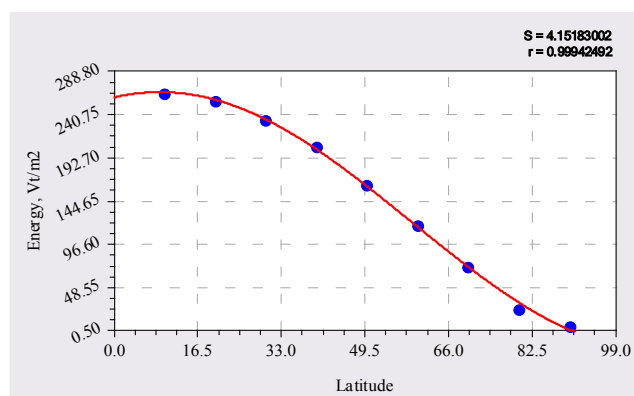


Рис. 1. Кореляція щільності теплового потоку сонячного випромінювання з широтою для Квітня

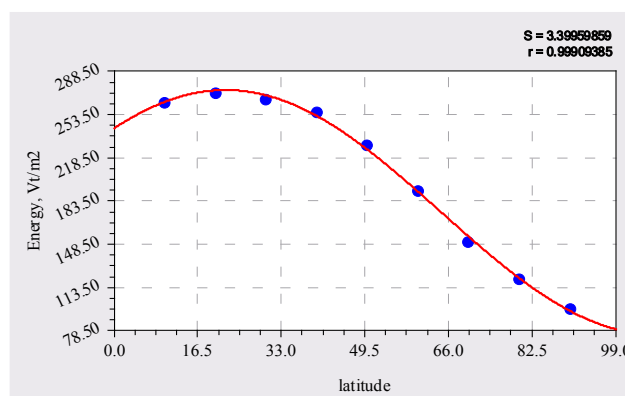


Рис. 2. Кореляція щільності теплового потоку сонячного випромінювання з широтою для Травня

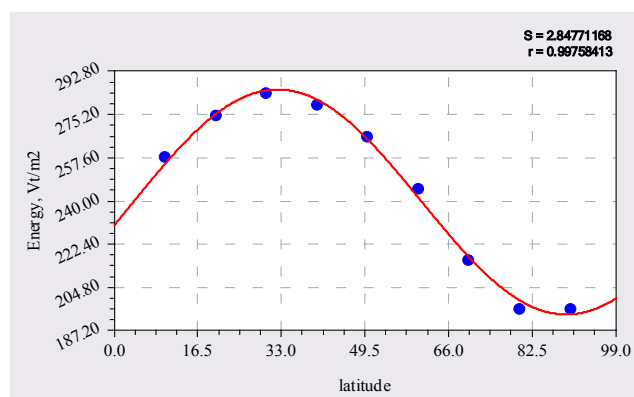


Рис. 3. Кореляція щільності теплового потоку сонячного випромінювання з широтою для Червня

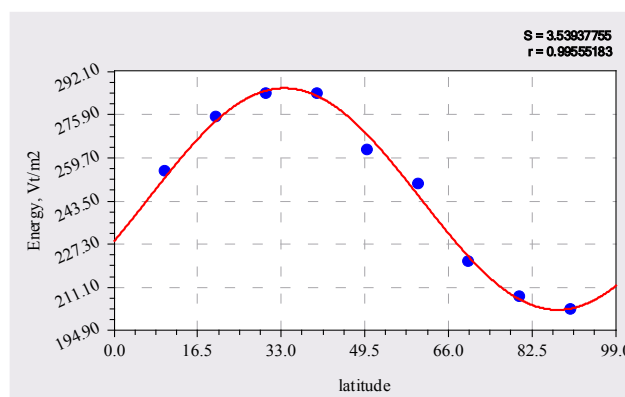


Рис. 4. Кореляція щільності теплового потоку сонячного випромінювання з широтою для Липня

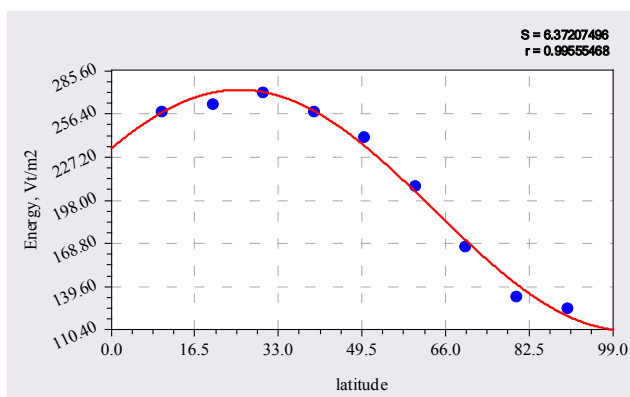


Рис. 5. Кореляція щільності теплового потоку сонячного випромінювання з широтою для Серпня

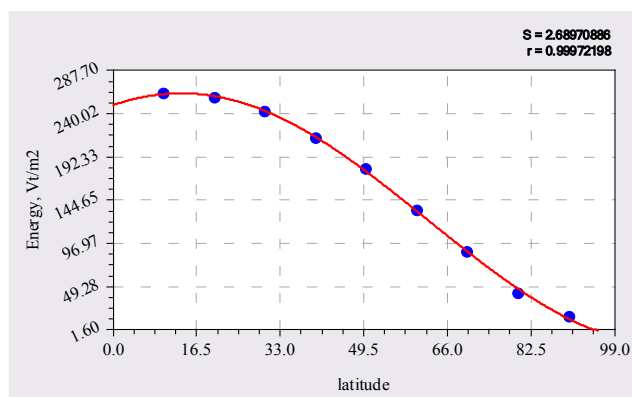


Рис. 6. Кореляція щільності теплового потоку сонячного випромінювання з широтою для Вересня

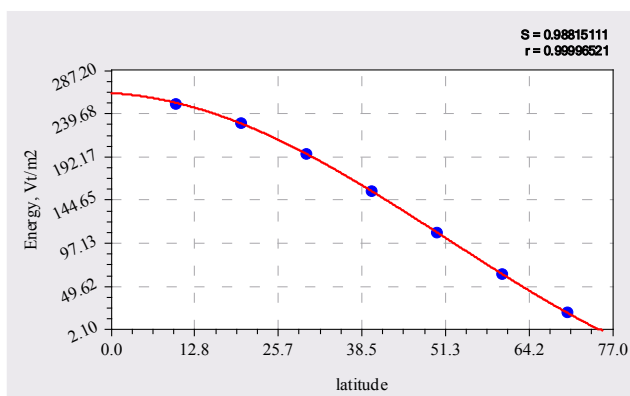


Рис. 7. Кореляція щільності теплового потоку сонячного випромінювання з широтою для Жовтня

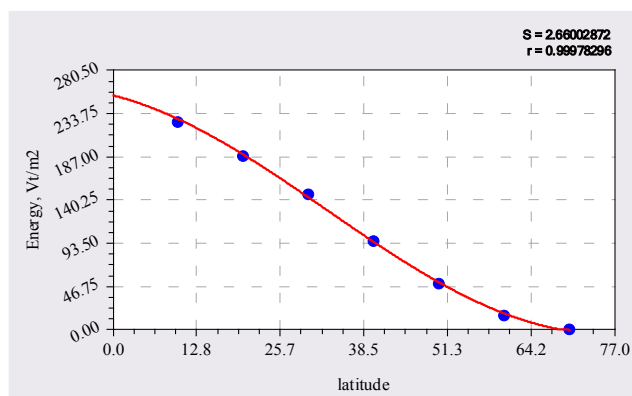


Рис. 8. Кореляція щільності теплового потоку сонячного випромінювання з широтою для Листопада

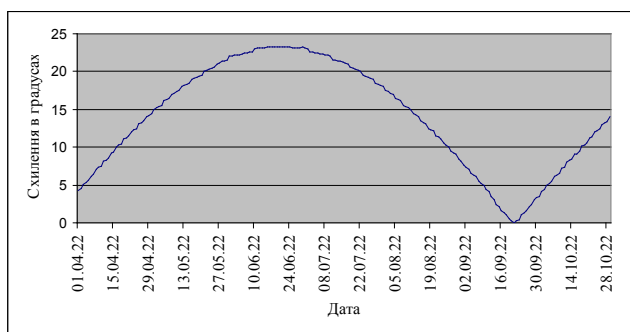


Рис. 9. Графік зміни схилення

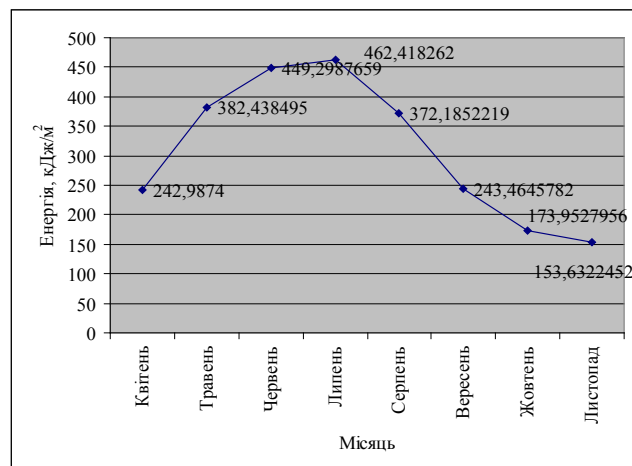


Рис. 10. Помісячний надходження енергії сонця в середньому для України (Дж/м²)

Далі необхідно розрахувати тривалість світлового дня, щоб використати узагальнені дані для отримання надходження сонячної енергії. В таблиці 2 зазначено показники розраховані для півдня України, але через один часовий пояс розбіжності будуть невеликими (дані після коми показано саме в хвилинах). Проте для більш точних досліджень в алгоритмі автоматичного оцінювання для окремої водойми пропонується використовувати дані калькулятора тривалості сонячного дня.

Дані по куту падіння сонячного світла опівдні, а також тривалість світлового дня розраховуємо стандартно за схиленням [18] на основі формули 9 та формули 10.

$$h = 90 - \varphi \pm \delta, \quad (9)$$

де φ – широта, δ – схилення.

$$h = 24 - \frac{24}{180} \arccos(\operatorname{tg} \lambda + \operatorname{tg}(\arcsin(\sin \alpha \sin \delta))), \quad (10)$$

де λ – широта точки, δ – схилення, α – широта тропіків $23^{\circ}27'2''$.

Середнє схилення в вегетаційний період становить 14° [19]. Його зміна відображена на графіку (рис. 9).

Наклавши дані на розроблені моделі було отримано графік помісячного приросту енергії в водоймі (рис. 10).

Наступний крок – визначення ступеню впливу лімітуючих факторів на потрапляння світла в воду. Для цього враховуємо, що при прямому падінні променів на водну поверхню відбиття становить не більше 2%, тому при наступних розрахунках ККД за біопродуктивністю треба домножувати на 0,98. В той же час, при зниженні кута падіння променів до

30°-5°, відбиття збільшується до 25-40% відповідно [20]. Якщо спиратись на лінійність даної функції, то отримуємо формулу (11):

$$y = 43 - 0,6. \quad (11)$$

Після цього розраховуємо кути падіння протягом дня, враховуючи, що кожну годину кут змінюється на 15 градусів відносно висоти сонця опівдні. Так для України в вегетаційний період середня тривалість дня становитиме 13 годин 18 хвилин для середньої розрахункової широти 48°23'.

Таким чином, кути падіння сонячних променів коливатимуться в межах визначених в таблиці 3.

Таблиця 2

Тривалість сонячного дня в вегетаційний період

Дата	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень
1	12,51	14,28	15,43	15,55	14,58	13,23	11,42
2	12,54	14,31	15,44	15,54	14,55	13,2	11,38
3	12,58	14,34	15,46	15,53	14,52	13,16	11,35
4	13,01	14,37	15,47	15,52	14,49	13,13	11,31
5	13,04	14,4	15,48	15,51	14,47	13,1	11,28
6	13,08	14,43	15,5	15,5	14,44	13,06	11,25
7	13,11	14,46	15,51	15,48	14,41	13,03	11,21
8	13,15	14,49	15,52	15,47	14,38	13	11,18
9	13,18	14,52	15,53	15,46	14,35	12,56	11,14
10	13,21	14,54	15,54	15,44	14,32	12,53	11,11
11	13,25	14,57	15,55	15,43	14,29	12,49	11,08
12	13,28	15	15,55	15,41	14,26	12,46	11,04
13	13,31	15,02	15,56	15,4	14,23	12,43	11,01
14	13,34	15,05	15,57	15,38	14,2	12,39	10,58
15	13,38	15,08	15,57	15,36	14,17	12,36	10,54
16	13,41	15,1	15,58	15,34	14,14	12,32	10,51
17	13,44	15,13	15,58	15,32	14,11	12,29	10,48
18	13,47	15,15	15,58	15,3	14,08	12,26	10,44
19	13,51	15,17	15,59	15,28	14,05	12,22	10,41
20	13,54	15,2	15,59	15,26	14,01	12,19	10,38
21	13,57	15,22	15,59	15,24	13,58	12,16	10,35
22	14	15,24	15,59	15,22	13,55	12,12	10,32
23	14,04	15,26	15,59	15,2	13,52	12,09	10,28
24	14,07	15,28	15,58	15,18	13,49	12,05	10,25
25	14,1	15,3	15,58	15,15	13,46	12,02	10,22
26	14,13	15,32	15,58	15,13	13,42	11,59	10,19
27	14,16	15,34	15,57	15,1	13,39	11,55	10,16
28	14,19	15,36	15,57	15,08	13,36	11,52	10,12
29	14,22	15,38	15,56	15,05	13,33	11,48	10,09
30	14,25	15,39	15,55	15,03	13,29	11,45	10,06
31		15,41		15	13,26		10,03
Усього	404,07	463,11	466,36	475,26	434,1	371,44	331,17

Таблиця 3

Кути падіння сонячних променів опівдні

Місяць	4	5	6	7	8	9	10	11
День	13,469	14,93903	15,54533	15,31806	13,99032	12,38133	10,6829	13,92
Схилення	9,56	18,55	23	21	13,46935	3,4	8,520355	18,376
Кут	51,56	60,55	65	63	55,46935	45,4	50,52035	66,606

Таблиця 4

Кути падіння сонячних променів та відсоток відбиття протягом доби

Кути	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад
Падіння	29,06	38,05	42,5	40,5	32,96935	22,9	28,02035	23,394
Відбиття	25,564	20,17	17,5	18,7	23,21839	29,26	26,18779	28,9636

Таблиця 5

Поправочні коефіцієнти відбиття γ сонячного випромінювання

Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад
0,74436	0,7983	0,825	0,813	0,767816	0,7074	0,738122	0,710364

Тоді середні кути падіння сонячних променів протягом доби визначаються за коливаннями в межах значень, менших за пікові з кроком в 15 градусів. Це дає нам результати, наведені в таблиці 4.

Відповідно, отримуємо таблицю поправочних коефіцієнтів для відбиття сонячних променів (таблиця 5):

Для хвилювання ступінь відбиття також збільшується. Наприклад, при легкому хвилюванні відбиття збільшується до 15%, при сильному – до 30%. Тут за основу беремо показник в 130 днів на рік, що становить 35,6% від всього часу, що враховуватиметься в вимірюваннях. Подібні ж дані наводять автори [21] для хмарності, що дозволяє здійснити потрібний розрахунок в середньому, а для конкретних об'єктів краще використовувати місцеві дані по клімату.

Враховуючи, що хмарність та вітер є ознаками циклональної погоди, вважатимемо, що дані по хмарності корелюють з циклонами, а тому влітку стає вдвічі менше хмарних днів близько 30% (40 % для півночі, 30% центр та частина півдня і 20% Крим), взимку їх близько 60%. Це означає, що за 244 дні вегетаційного періоду, що становить 3218 годин та 34 хвилини з 5856 тобто близько 54,95%, віднявши зимові 70%, отримуємо 72,6 з 130 днів з циклональною погодою, тобто на вегетаційний період лишилося 48,4 доби, з яких лише 54,95% припадуть на світлий час. Це 638 годин та 30 хв. Це дає 19,83% хмарного та вітряного часу. Вважатимемо, що вони впливають на поглинання сонячного світла в середньому на 20% тільки в зазначений період.

Період хвилювання та хмарності ми позначаємо додатковим коефіцієнтом $\mu = 0,8$.

Відповідно реально доступна ФАР (фотосинтетична активна радіація) визначається через окремий розрахунок з використанням поправочних коефіцієнтів відбиття γ до даних рисунку 10, але з урахуванням, що дані величини розраховуються для 80,17% часу (використовуємо коефіцієнт 0,8017 разом з ними) (12):

$$\Phi AR_{\text{ясн}} = 0,8017\gamma E, \quad (12)$$

Для циклональної погоди використовуємо коефіцієнт γ разом з коефіцієнтами хмарності $\mu = 0,8$ та часткою від загального часу 0,1983 (13):

$$\Phi AR_{\text{ясн}} = 0,1983\gamma\mu E, \quad (13)$$

Їх сума і визначатиме загальне надходження енергії в водойму після поправки на погодні чинники (14).

$$\Phi AR_{\text{ясн}} = 0,8017\gamma E + 0,1983\gamma\mu E. \quad (14)$$

Таким чином отримано результати надходження енергії під дією погодних чинників (рис. 11).

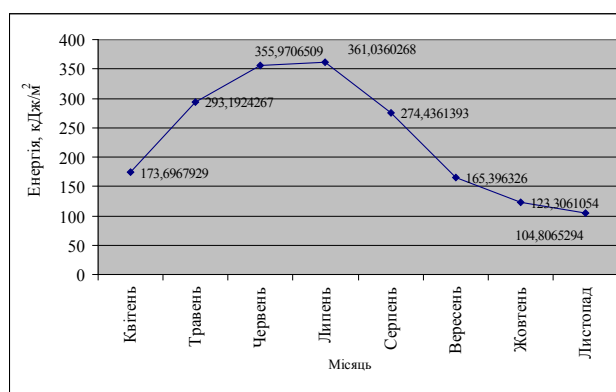


Рис. 11. Надходження енергії після дії погодних чинників

Отримана загальна сума становить близько 0,75 від первинного значення, що є дещо вищим, ніж ми розраховували.

Наступним кроком є стехіометрія реакції фотосинтезу [13]. Для початку варто внести ще один поправочний коефіцієнт, що характеризує поглинання випромінювання товщею води. Для поглинання світла прозорою водою основою є поглинання на глибині 1 м 36% червоного спектру (620–760 нм), 23% помаранчевого (585–620 нм), 7% жовтого (575–585 нм), 1,6% зеленого (510–550 нм) та 0,5% синього (450–480 нм). Глибину літоралі використовуємо як поправочний коефіцієнт для цих значень. Середня прозорість води для річок України 1,1,5 м за диском Секкі, але забруднені річки можуть мати набагато нижчу прозорість. Вважаємо, що поправочних коефіцієнтів потребують лише водойми з глибиною літоралі менше 1 м, а фотосинтез відбувається в цьому верхньому шарі.

Для фотосинтезу використовується випромінювання з довжиною хвилі 400–700 нм, що автоматично встановлює верхню планку ККД фотосинтезу в 11% [22], а також робить актуальними поправочні коефі-

цієнти вказані вище. Середній показник поглинутого світла в такому випадку становитиме 13,62%, що потребуватиме введення додаткового коефіцієнту 0,8638 при розрахунку використаної в фотосинтезі енергії. Сумарно це дає 1567,628 МДж енергії на метр квадратний на рік.

Далі, при оцінюванні обсягів засвоєння сонячної енергії автотрофами, необхідно визначати відсоткове співвідношення в біомасі їх основних відділів – *Cyanophyta* (ціанобактерії) 14%; *Bacillariophyta* (діатомові водорості) 43%; *Chlorophyta* (зелені водорості) 16%; *Euglenophyta* (евгленіди) 7%; *Dinophyta* (динофлагеляти) 1 7%[23]; *Cryptophyta* (криптофіти), *Chrysophyta* (хризоліти, золоті водорості) та інші – сумарно 3%.

Тепер необхідно визначити їх ККД фотосинтезу за біопродуктивністю в біореакторах [24].

Визначаємо, що при надходженні енергії в 4,5 Вт/л (або 16200 Дж) в умовно ідеальному середовищі (пам'ятаємо про 2% поглинання, що дає 15860 Дж) отримано продуктивність найпоширеніших груп *Chlorophyta* в 0,525 г/добу, або 0,021875 г/год, що при калорійності 4,72 ккал/г дає 0,10325 ккал/год в літрі води, або 432,2871 Дж. Це дає нам ККД фотосинтезу біля 2,73%. Нормальне значення в 0,38 г/добу аналогічним чином дає ККД фотосинтезу 1,98 % і буде вважатись основним при розрахунках.

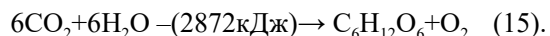
Для *Cyanophyta* такий приріст становив близько 0,49 г/добу, або 0,02042г/год, що при калорійності 4,41 ккал/г дає 0,0901 ккал, або 377,23068 Дж. Це дає ККД фотосинтезу близько 2,38%.

Euglenophyta дала приріст 0,81 г/добу при подвоєному освітленні, тобто 9,44 Вт/л, або 33984 Дж. При калорійності, аналогічній до зелених водоростей, та прирості 0,03375 г/год, дає 0,1593 ккал або 666,96 Дж. Це означає ККД 1,96%.

ККД для всіх інших видів за відсутності даних вважатимемо в районі 1,65% відповідно до даних на яких базувалась попередня модель.

Таким чином отримуємо загальний ККД 1,83%.

Рух енергії через стехіометрію кисню виражається за допомогою еквівалентної величини затрат 2872кДж енергії на генерацію 192 г O₂ в процесі синтезу 1 моль глюкози (180 г).



Враховуючи те, що на рік за нашим розрахунком до 1 м² площі водойми потрапляє 1567,628 МДж/м², ми можемо розрахувати ФАР з урахуванням ККД фотосинтезу 28687,5924 кДж, що супроводжується виділенням 1917,833 48 г (біля 1,92 кг) кисню та депонування 2637,02103 г (біля 2,6 кг) вуглекислого газу (0,2729 цієї величини це вуглець, що дає за депонування вигоду 0,0698 доллара з м²) та приросту 1797,96888 г (біля 1,8 кг) біомаси.

Проте, цей розрахунок необхідно також доповнити лімітуючими факторами для біоти, що визначаються солоністю, перемішуванням, ORP, впливом

забруднюючих речовин та рядом інших факторів, які системно впливають на організми. Всі ці фактори можна об'єднати в формулі розрахунку індексу екологічної безпеки водойми [25].

Окисно-відновний (редокс) потенціал є величиною, яка відображає баланс між постачанням йонів відновника (водню) водоймою та приходом кисню як окисника з атмосфери. Разом з показником рН, ORP дозволяє скласти уявлення про так званий «поживний клімат» у воді через розрахунок показника гН (16) – десятичного логарифму, що визначає тиск йонів водню в редокс-системі.

$$rH = \frac{E}{28,9} + 2pH, \quad (16)$$

де E – редокс потенціал.

Величина гН встановлює шкалу окисного потенціалу води:

40-42 – атмосфера кисню з максимальним окисленням;

35 – сильне окислення;

30 – помірне окислення;

25 – слабе окислення;

20 – слабе відновлення;

15 – помірне відновлення;

10 – сильне відновлення;

0-5 – атмосфера водню.

Для водних істот оптимумом є показник 16-36, а для водних рослин 27-36.

Оскільки узагальнених даних в літературі не знайдено, спиратимемось на результати власних вимірювань для річки Південний Буг. В таблиці 5 наведено результати аналізу даних, отриманих в ході експедиції 2021 року.

Таблиця 5

Результати вимірювань Редокс-потенціалу вод річки Південний Буг

ORP	pH	гН
-37,4	7,7	14,10588
-56	8,02	14,10228
-67,5	8,18	14,02436
-67	8,13	13,94166
-67,8	8,2	14,05398
-81,6	8,45	14,07647
-96,7	8,71	14,07398

Отримані величини гН дозволяють констатувати, що середовище не є оптимальним і в цілому показник близько 14, є вдвічі нижчим за оптимум для водних рослин. Відповідно, треба застосовувати поправочний коефіцієнт 0,5 для отриманих раніше результатів.

Разом з тим необхідно визначати достатність будівельного матеріалу для фітопланктону за закономірністю Редфілда. Це важливий показник для NCP-стехіометрії. Така величина 106(C):16(N):1(P)

є оптимумом.

За запитом на підприємство «Спіруліна ЛТД» було отримано дані про споживання добрив на одиницю маси за вирощування в резервуарах – 200 мг/г сухої речовини спіруліни азоту. Відповідно, розрахунок за закономірністю Редфілда демонструє, що споживання фосфору становитиме 12,5 мг/г сухої маси а поглинання вуглецю 1325 мг/г сухої маси. В нашому випадку в більшості водойм наявний надлишок сполук азоту та фосфору, спричинений антропогенним впливом, тому тут скоріше йдеться саме про біоекстракцію забрудників. Поправочний коефіцієнт не вводиться.

Окрім того, було розроблено методики оцінки токсикологічного та енергетичного відгуку для водойми, що також є частиною тих самих лімітуючих коефіцієнтів [26].

$$IEB_r = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n k_i}, \quad (16)$$

де k_i – показник смертності стенобіонтів при перевищенні i -ої концентрації забруднювача у природному середовищі.

$IEB_r = 0,1294e^{0,031x}$, представлена експоненціальною функцією по віддаленості від гирла. Її розрахунок ведеться на основі відповідності санітарного пропуску. Швидкість течії має бути не менше 0,29 м/с. Для Південного Бугу цей показник становить 0,14 м/с і це означає потребу в введенні коефіцієнту IEB_r , що становитиме 0,48.

Паралельно з цим за смертністю та видовим різноманіттям стенобіонтів розраховується другий IEB_e – енергетичний індекс екологічної безпеки (17).

$$IEB_e = \frac{1}{n} \left(\frac{E_1}{E_{01}} + \frac{E_2}{E_{02}} + \dots + \frac{E_n}{E_{0n}} \right), \quad (17)$$

де величини від E_1 до E_n характеризують сучасні показники чисельності або щільності живих компонентів певного виду в екосистемі;

E_{01} до E_{0n} – історично зафіксовані та прийняті за «еталонні» значення показників чисельності (щільності) живих компонентів певного виду в екосистемі. Для Бугу він становить 0,31. Це вказує на помірний рівень забрудненості водойми (III клас), що цілком відповідає оцінкам за ІЗВ.

Ще одним лімітуючим фактором, визначеним в процесі дослідження був вплив солоності на ріст макрофітів, що визначається формулою (18)

$$y = -11x + 361,7. \quad (18)$$

Цей коефіцієнт застосовується залежно від умов водойми при моделюванні відповідного рівня трофічної піраміди.

Виведені коефіцієнти необхідно усереднювати, а не використовувати кожен окремо, тому чим більше факторів враховано, тим точніша модель в прикладному аспекті, але для загальної картини достатньо і одного з них.

В нашому випадку – це буде поправочний коефіцієнт 0,43, що є усередненим від усіх попередніх.

Це дає реальну сумарну енергію на метр квадратний в 12335,66473 кДж, приріст біомаси 773,1266184 г з квадратного метра поверхні водойми і 30 \$ за депонування вуглецю.

Мірою Прозорості води служить висота стовпа води, при якій можна спостерігати білий диск-прозоромір (диск Секкі) певних розмірів, що його занурюють у воду, або розрізняти на білому папері стандартний шрифт певного розміру і типу. Прозорість одночасно є і глибиною літоралі.

Формула для визначення евтрофікації (19):

$$C_{fit} = 0,1 \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{h} - 0,04}{0,158} \right)^3}, \quad (19)$$

Це дає можливість розрахувати значення прозорості води, яке стане поправочним коефіцієнтом для моделювання масо-об'ємної стратифікації продуктів в водоймі (20).

$$h = \frac{2}{0,04 + 0,158 \cdot \sqrt[3]{(10 \cdot C)_{fit}^2}}. \quad (20)$$

Концентрацію фітопланктону C_{fit} розраховуємо за насиченістю киснем, за співвідношенням 1 г органічної речовини фітопланктону, що є рівним 21,35527 кДж енергії або 1,5 г кисню та дає біомасу 5776,40389 г/м² або C_{fit} в обсязі 332,43 г/м³ на рік, 332,43 мг/л (водні ресурси поверхневих вод України близько 12074 км² водного дзеркала та 209,8 км³ об'єму). Враховуючи розподіл на 8 місяців вегетаційного періоду, то концентрації теоретично можуть коливатись від 1,38 до 41,6 мг/л.

За правилом трофічного ланцюга це означає, що макрозообентос та фільтратори матимуть теоретичний приріст біомаси 577,64 г/м², риби 57,76 г/м², хижі риби – 5,76 г/м².

Враховуючи те, що індексування сапробності водойм відбувається саме за щільністю посадки та видовим різноманіттям організмів з даної групи, ці норми можуть бути використані як еталонні значення. Тобто не здійснення визначення сапробності за біотою, а прогнозування стану біоти на визначеному рівні за сапробністю водойми.

Враховуючи те, що попередня ланка є кормовою базою наступної, можемо прогнозувати відновлювані ресурси у вигляді рибних запасів. Це означатиме потенційні відновлювані ресурси риби в 577,6 кг/га на рік. Проте, в практиці аквакультури є дані, на які можна орієнтуватись – чіткі норми по природній рибопродуктивності для ставків, що становить в середньому 505 кг/га для рослинних видів риб та 340 кг/га для коропа. При цьому застосовуються поправочні коефіцієнти для різних ґрунтів вирощувальних ставів: галькові, піщані та солончакові, торф'яні та чорноземи відповідно – 0,4; 0,6; 0,5; 1,2 [27].

Їх використання в прогнозуванні для біоресурсів в харчовому ланцюзі є обов'язковим.

Крім того, для природних екосистем варто також враховувати погодні явища, що визначаються багатьма ресурсами у вигляді прогнозів клювання різних порід риб. Дані прогнози від 1 до 5 балів відображають інтенсивність харчування, а відповідно і приросту біомаси риб. Їх можна відображати у вигляді коефіцієнтів з кроком в 0,2 за бал.

Винос біомаси може бути визначений за статистичними даними про вилов водних ресурсів, а також у вигляді прогнозу на основі даних про потреби в харчуванні водоплавної птиці та про її чисельність.

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження. Відповідно, отриманий алгоритм дозволяє створити базу для динамічного точкового прогнозування біопродуктивності водних біоценозів на першому рівні – продуцентів. Це дозволяє характеризувати водні екосистеми, як відкриті системи, в які відбувається занесення енергії сонця та виніс біомаси. Використання астрономічних даних та динамічних показників дозволяє створити автоматизований алгоритм, що аналізуватиме біопродуктивність водойм, спираючись на дані про їх розмір, координати, погодні умови та ряд інших динамічних факторів.

В результаті проведеного дослідження отримано:

- функції надходження сонячної енергії на одиницю площі в вегетаційний період (8 синусоїд);
- метод розрахунку поправочних коефіцієнтів на основі широтності, з урахуванням зміни кута падіння сонячних променів протягом дня та циклональної погоди;
- метод розрахунку ККД фотосинтезу основних груп мікро водоростей за їх біопродуктивністю в біореакторах;
- лімітуючі коефіцієнти визначені перемішуванням, токсико-екологічним відгуком, NCP-співвідношенням Редфілда та солоністю;

- модель екологічної стехіометрії фотосинтезу продуцентів водойм з отриманням для прикладу середнього результату для України.

Отримана методика дозволить в ГІС-пакетах накладати на векторне зображення водойми сітку з кроком в 1 м² та за означеними формулами визначати локальну потенційну біопродуктивність потенційно за розробленою моделлю та реально за NDVI-індексом з супутникових знімків. Для більш точного моделювання необхідно провести прикладні дослідження біопродуктивності найпоширеніших в українських водоймах видів фітопланктонних організмів та моніторинг динаміки їх сезонних коливань чисельності. Крім того, необхідно створити векторну карту водойм, де кожна з них була б обведена окремо.

Отримана модель є базою для розробки програмного забезпечення, здатного здійснювати поточні розрахунки для прогнозування стану екосистеми водойми в реальному часі. Автоматичний розрахунок для кожного метру квадратного поверхні водного дзеркала з урахуванням його точних координат, погодних умов, дна, швидкості течії та найпоширеніших угруповань фітопланктону, макрозообентосу та риб дозволить створити детальну динамічну модель стану водного біоценозу.

Завдяки чому можна буде з високою точністю оцінювати прогнозні ресурси біомаси, можливості з депонування вуглецю та інші властивості водойми.

В перспективі буде проведено ряд робіт з оцифрування карт водойм, визначення ККД фотосинтезу основних фітопланктонних культур та налаштування програми, що здійснюватиме моделювання на основі даних з відкритих джерел. Отримані результати буде доповнено новими даними власних польових вимірювань, подальшою розробкою послідовної стратегії досліджень річок півдня України, в рамках проведення подальших наукових робіт та виконання практики студентами екологами ЧНУ ім. Петра Могили.

Література

1. R. W. Sterner and J. J. Elser (2002) Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. Princeton University Press. pp. 584. ISBN 069107491.
2. UNSD (2020). Using the SEEA EA for Calculating Selected SDG Indicators, United Nations Statistics Division, Department of Economic and Social Affairs, New York URL: https://seea.un.org/sites/seea.un.org/files/documents/Indicators/3._using_the_seea_ea_for_calculating_selected_sdg_indicators.pdf (дата звернення 21.09.2022).
3. Lindeman R. L. The Trophic-Dynamic Aspect of Ecology (PDF). *Ecology*. 23 (4), P. 399–417. URL: <https://doi.org/10.2307/1930126> (дата звернення 10.10.2022).
4. Ling Meng, Fanzhu Qu, Xiaoli Bi, Jiangbao Xia, Yunzhao Li, Xuehong Wang, Junbao Yu, Elemental stoichiometry (C, N, P) of soil in the Yellow River Delta nature reserve: Understanding N and P status of soil in the coastal estuary. *Science of The Total Environment*, Volume 751, 2021, 141737, ISSN 0048-9697, URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141737> (дата звернення 10.10.2022).
5. Лакуста О. Н., Руденко С. С. CNP-стехиометрия трансграничных рек – Днестра, Прута и Сирета – на выходе из Украины. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2017. № 5 (69). URL: <http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2017.05.002> (дата звернення 10.10.2022).
6. Yong Li, Enze Kang, Bing Song, Jinsong Wang, Xiaodong Zhang, Jinzhi Wang, Meng Li, Liang Yan, Zhongqing Yan, Kerou Zhang, Haidong Wu, Xiaoming Kang, Soil salinity and nutrients availability drive patterns in bacterial community and diversity along succession gradient in the Yellow River Delta. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Volume 262, 2021, 107621, ISSN 0272-7714. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107621> (дата звернення 10.10.2022).

7. Qiongqiong Lu, Junhong Bai, Guangliang Zhang, Qingqing Zhao, Jianjun Wu, Spatial and seasonal distribution of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur and their ecological stoichiometry in wetland soils along a water and salt gradient in the Yellow River Delta, China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2018. Volume 104. Pages 9–17, ISSN 1474-7065. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.04.001> (дата звернення 10.10.2022).
8. Руденко С. С. Вплив антропогенних чинників на CNP-стехіометрію води річкових екосистем. Біологічні системи. 2018. Т. 10, Вип. 2. С. 169–175. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/biolsist_2018_10_2_12 (дата звернення 10.10.2022).
9. Annette B.G. Janssen, Sven Teurlincx, Arthur H.W. Beusen, Mark A.J. Huijbregts, Jasmijn Rost, Aafke M. Schipper, Laura M.S. Seelen, Wolf M. Mooij, Jan H. Janse, PCLake+: A process-based ecological model to assess the trophic state of stratified and non-stratified freshwater lakes worldwide. *Ecological Modelling*. 2019. Volume 396. Pages 23–32. ISSN 0304-3800, URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.01.006> (дата звернення 10.10.2022).
10. Рибченко Л. С., Ревера Т. О. Сумарна сонячна радіація та альbedo підстильної поверхні в Україні. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2007. Вип. 256. С. 99–111. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/51523> (дата звернення 10.10.2022).
11. Дмитренко Л. В., Барандіч С. Л. Оцінка кліматичних ресурсів сонячної енергії в Україні. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2007. Вип. 256. С. 121–129. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/51525> (дата звернення 10.10.2022).
12. Jaromír Petřáala. Simple analytic formula for the light-tube optical efficiency under overcast sky conditions. *Solar Energy*. 2019. Volume 194. Pages 47–50. ISSN 0038-092X. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.032> (дата звернення 12.10.2022).
13. Андреев В.І., Случак О.І., Случак О.І. Энергетика водной экосистемы. *Екологія та раціональне природокористування* : збір. тез доп. конф. Ольвійський форум – 2022: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2022. С. 5–10.
14. Кондратьев К.Я. Радиационные факторы современных измерений глобального климата. Л., 1980, 279 с.
15. Redfield, A.C. On the Proportions of Organic Derivatives in Sea Water and Their Relation to the Composition of Plankton. *James Johnstone Memorial Volume*, University Press of Liverpool, 176–192. URL: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1883475](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1883475) (дата звернення 12.10.2022).
16. Водний фонд України: Штучні водойми — водосховища і ставки : Довідник / За ред. В. К. Хільчевського, В. В. Гребеня. Київ : Інтерпрес, 2014. 164 с.
17. Han J., LeeD., Lee S., Chung S.–W., KimS. J.,Park M., LimK. J.,Kim J. (2019). Evaluation of the Effect of Channel Geometry on Streamflow and Water Quality Modeling and Modification of Channel Geometry Module in SWAT: A Case Study of the Andong Dam Watershed. *Water*. Volume 11, 718. URL: <https://doi:10.3390/w11040718> (дата звернення 12.10.2022).
18. Схилення. Астрономічний енциклопедичний словник / за заг. ред. І. А. Климишина та А. О. Корсунь. Львів : Голов. астроном. обсерваторія НАН України : Львів. нац. ун-т ім. Івана Франка, 2003. С. 465.
19. Астрономічний календар. 2022 / ред. кол.: А. П. Відьмаченко (гол. ред.) та ін.; ГАО НАН України. Київ : Академперіодика, 2021. 214 с. URL: https://www.mao.kiev.ua/docs/artid080_calendar-2022.pdf (дата звернення 16.10.2022).
20. Давыдов Л.К., Дмитриева А.А., Конкина Н.Г. Общая гидрология. Л., 1973. 462 с.
21. Краковська С. В., Паламарчук Л. В., Білозерова А. К., Шпиталь Т. М. Загальна хмарність в Україні до середини ХХІ ст. за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей. *Геоінформатика*. 2017. № 3. С. 56–66. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/geoinf_2017_3_9 (дата звернення 16.10.2022).
22. Miyamoto, K. (1997). Renewable Biological Systems for Alternative Sustainable Energy Production. Issue 128 of FAO Agricultural Services Bulletin, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: <https://www.fao.org/3/w7241e/w7241e05.htm#1.2.1> (дата звернення 16.10.2022).
23. Мінаєва, Г. М. Структурно-функціональні характеристики фітопланктону водотоків нижнього Дніпра. *Природничий альманах (біологічні науки)*. 2021. (30), 75–83. URL: <http://na.kspu.edu/index.php/na/article/view/653> (дата звернення 16.10.2022).
24. Урмыч Е. М., Бердыкулов Х. А., Эшпулатова М. Б. Продуктивность микроводорослей в интенсивных условиях культивирования. *Альгология*. 2008. Т. 18, № 3. С. 347–352. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/algol_2008_18_3_14 (дата звернення 16.10.2022).
25. Mitryasova O., Pohrebennyk V., Bezsonov Y., Mats A. Environmental Risk and State of Surface Water Resources. *Climate Change & Sustainable Development: New Challenges of the Century* : Monograph. Mykolaiv : PMBSNU. Rzeszow: RzUT, 2021. P. 279–288. URL: <https://chmnu.edu.ua/wp-content/uploads/MONOGRAPH-2.pdf>. (дата звернення 18.10.2022).
26. Bezsonov Y., Andreev V. Justification and formalization of approach to regional environmental safety evaluation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. URL: <https://doi.org/2.9.10.15587/1729-4061.2016.64843> (дата звернення 18.10.2022).
27. Андрущенко А. І., Алимов С. І. Ставові рибництво. Київ : НАУ, 2008. 636 с. URL: <https://uteka.ua/ua/publication/agro-4-gospodarski-operacii-v-agrosektori-35-praktichni-rekomendacii-shhodo-zariblennya-viroshhuvalnix-staviv> (дата звернення 20.10.2022).