

УДК 532.465, 574.586

МОДЕЛЬ ЕКОГІДРОДИНАМІКИ МІЛКОЇ ВОДОЙМИ

Р. В. БЕЖЕНАР

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, Київ**Одержано 11.12.2009*

Побудована тривимірна система моделей мілких водойм, яка складається з термогідродинамічної моделі ТРИТОКС, а також моделі переносу намулів та моделі екодинаміки. Модель екодинаміки описує перенос і реакції перетворення основних органічних та неорганічних речовин, в тому числі розвиток придонної рослинності. Досліджені зв'язки між моделями, а саме вплив придонної рослинності на гідродинаміку, процеси переносу намулів та поживних речовин, а також вплив концентрації змучених намулів та поживних речовин на розвиток придонної рослинності. Проведено розрахунок характеристик мілкої водойми з використанням описаного комплексу моделей.

Построена трехмерная система моделей мелких водоемов, которая включает в себя термогидродинамическую модель ТРИТОКС, а также модель переноса взвеси и модель экодинамики. Модель экодинамики описывает перенос и реакции превращения основных органических и неорганических веществ, в том числе и развитие придонной растительности. Исследованы связи между моделями, а именно влияние придонной растительности на гидродинамику, процессы переноса взвеси и питательных веществ, а также влияние концентрации взвеси и питательных веществ на развитие придонной растительности. Проведен расчет характеристик мелкого водоема с использованием описанного комплекса моделей.

3-dimensional system of models for shallow waters that includes thermohydrodynamical model THREEETOX, model of sediments transport and model of ecodynamics was built. Model of ecodynamics describes transport and reactions of transformation main organic and inorganic matter including evolution of submerged macrophytes. Interactions between these models such as influence of submerged microphytes on hydrodynamics and transport of sediments and nutrients as well as affect of concentration of sediments and nutrients on evolution of submerged macrophytes were investigated. Calculation of characteristics of shallow water body using described system of models was realized.

ВСТУП

Для моделювання гідродинаміки мілких водойм важливе значення має врахування течій, поверхневих хвиль, детальний опис всіх теплових потоків, включаючи теплообмін з дном, а також моделювання росту придонної рослинності (періфітону), яка впливає на величину шорсткості дна водойми. Для моделювання росту періфітону необхідно описати кругообіг поживних речовин у водоймі. А для опису розсіяння світла в товщі води потрібно врахувати концентрації змучених намулів та фітопланктону в воді. Отже, основні процеси в мілких водоймах можна описати за допомогою чотирьох взаємодіючих між собою моделей: моделі циркуляції, моделі хвиль, моделі переносу намулів та моделі екодинаміки.

На рис. 1 показані основні процеси, які описує розроблена модель мілких водойм. Під дією вітру в водоймі формуються течії, які разом з поверхневими хвилями зумовлюють турбулентні процеси. Під їхнім впливом відбувається змучення намулів. Також течії переносять поживні речовини, необхідні для росту фітопланктону і періфітону. В свою чергу, періфітон гальмує течії, сприяючи осадженню намулів. Тепловий режим водойми визначається сонячною радіацією. Вдень світло поглинається водою та дном, причому поглинання

світла в воді залежить від концентрації фітопланктону і змучених намулів. Вночі відбувається зворотній обмін тепла: вода віддає тепло в атмосферу, а з дна тепло переходить у воду. До моделі включений опис областей, які можуть осушуватись при опусканні рівня води і затоплюватись при його піднятті. При цьому деяка частина водойми може бути відокремлена від основної області. В цьому випадку всі процеси моделюються в кожній частині окремо, а взаємодія відбувається лише в моменти затоплення.

В даній роботі описана тривимірна модель, що включає до себе модель термогідродинаміки ТРИТОКС, яка детально описана в [5, 11], модель переносу змучених намулів та модель екодинаміки. Вплив хвиль на течії, описаний в [13], у даній задачі не розглядається. Побудована модель використана для розрахунку характеристик мілкої водойми.

1. МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСУ НАМУЛІВ

Процеси переносу змучених намулів описані адвективно-дифузійним рівнянням

$$\frac{\partial S_d}{\partial t} + U \frac{\partial S_d}{\partial x} + V \frac{\partial S_d}{\partial y} + (W - W_g) \frac{\partial S_d}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu'_t \frac{\partial S_d}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial S_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial S_d}{\partial y} \right), \quad (1)$$

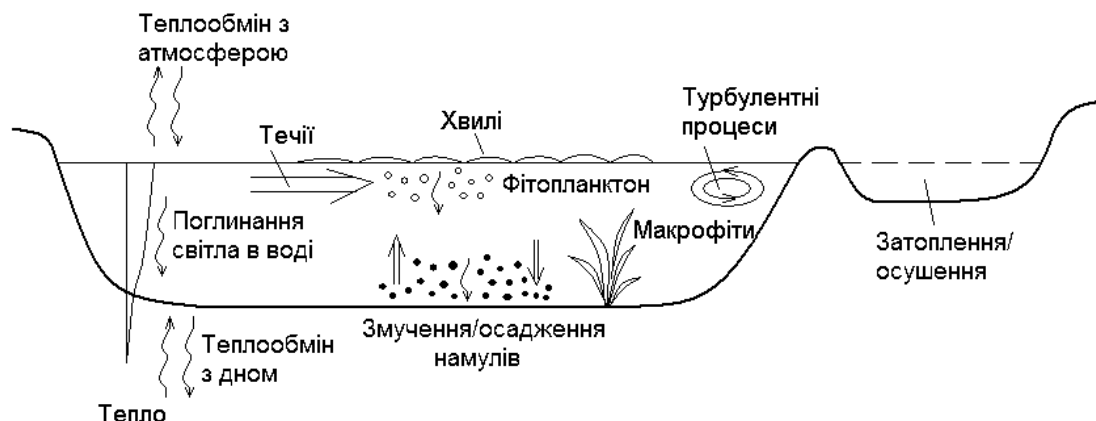


Рис. 1. Схема гідротермодинамічних процесів у мілкій водоймі

де S_d – концентрація змучених намулів; t – час; U, V, W – компоненти вектора швидкості; x, y – горизонтальні координати; z – вертикальна координата; ν'_t і A_h – коефіцієнти вертикальної і горизонтальної дифузії відповідно; W_g – швидкість осідання змучених частинок у полі сили тяжіння. Граничну умову на поверхні водоему можна представити як відсутність потоку змучених намулів. На донній границі вертикальний потік змучених намулів приймається рівним сумі потоків змучення і осадження твердих частинок. При цьому, в залежності від розмірів, намули діляться на некоагулюючі і коагулюючі. Для кожного з цих типів частинок використовуються свої формули для опису потоків змучення і осадження. Оскільки коагулюючі частинки злипаються, то це приводить до збільшення їхніх розмірів, що необхідно врахувати у виразі для швидкості осідання частинок. Згідно [12], формулу для швидкості осідання змучених частинок можна записати у вигляді

$$W_g = \frac{(\rho_s - \rho_w)gD_0^2}{18\mu} + \frac{k_A}{k_B}D_0 \frac{(\rho_s - \rho_w)}{18\nu} \frac{S_d}{\sqrt{G}}, \quad (2)$$

де ρ_w і ρ_s – густини води і частинок намулу відповідно; g – прискорення вільного падіння; D_0 – діаметр твердої частинки (вважається, що всі частинки однакового діаметру); μ і ν – динамічна і кінематична в'язкість води; $G = \sqrt{\epsilon/\nu}$, ϵ – швидкість дисипації енергії турбулентності; $k_A = 14.6 \text{ м}^2\text{кг}^{-1}$ і $k_B = 14000 \text{ с}^{1/2}\text{м}^2$ – емпіричні коефіцієнти [10].

2. МОДЕЛЬ ЕКОДИНАМІКИ

Екологічний стан водоему можна охарактеризувати концентрацією органічних і неорганічних речовин. Як правило, важливим є вміст сполук азоту і фосфору в воді. Коротко кругообіг речовин

при формуванні первинної продукції можна описати так: фітопланктон і перифітон для свого росту використовують неорганічний азот, фосфор і вуглекислий газ, виділяючи при цьому кисень у процесі фотосинтезу. Після відмирання фітопланктону і перифітону виділяються органічні сполуки азоту, фосфору і вуглецю, які в результаті мінералізації та окислення трансформуються знову ж таки в неорганічні сполуки.

Виділимо три області застосування моделі: вода, придонний шар і донні відкладення. У воді процеси переносу і реакції перетворення розчинних сполук, фітопланктону та зоопланктону описані адвективно-дифузійними рівняннями

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} + U \frac{\partial C_i}{\partial x} + V \frac{\partial C_i}{\partial y} + (W - W_{gi}) \frac{\partial C_i}{\partial z} = & \quad (3) \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu'_t \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + S_i, \end{aligned}$$

де C_i – концентрація i -тої змінної моделі екодинаміки; $i = 1$ відповідає амонійному азоту, $i = 2$ – нітратному азоту, $i = 3$ – неорганічному фосфору, $i = 4$ – фітопланктону, $i = 5$ – біологічному споживанню кисню, $i = 6$ – розчиненому у воді кисню, $i = 7$ – органічному азоту, $i = 8$ – органічному фосфору, $i = 9$ – зоопланктону; W_{gi} – швидкість осідання нерозчинних у воді частинок у полі сили тяжіння; S_i – доданки, які відповідають реакціям хімічних перетворень кожного з компонентів моделі, взяті з камерної моделі якості води і циклів поживних речовин WASP6 [1]. Граничні умови аналогічні граничним умовам для змучених намулів. Виняток становить розчинений у воді кисень, якщо його концентрація нижча концентрації насичення. В цьому випадку граничною умовою,

що описує процес аерації, є формула О'Коннора [1].

В придонному шарі до дев'яти описаних вище речовин додається моделювання перифітону, для якого розв'язується рівняння балансу мас у вигляді

$$\frac{\partial C_P}{\partial t} = S_P, \quad (4)$$

де C_P – концентрація перифітону на дні; S_P – доданок, який описує хімічні перетворення. Варто зауважити, що оскільки перифітон, на відміну від інших змінних моделі екодинаміки, прикріплений до дна, то доданки, пов'язані з адвекцією і дифузиею в рівнянні балансу мас відсутні, і в хімічних взаємодіях він приймає участь лише в придонних вузлах.

Хімічні реакції, які приводять до зміни концентрації перифітону, можна поділити на реакції росту та відмирання. Інтенсивність росту перифітону залежить від температури, концентрації поживних речовин і освітленості, тоді як величина відмирання залежить лише від температури води.

В донних відкладеннях також розв'язується рівняння балансу мас для кожної змінної з урахуванням хімічних взаємодій між ними. Це дає змогу розрахувати загальну масу речовин у донних відкладеннях, їхню товщину та концентрацію кожної сполуки в них, що визначає потоки змучення в граничних умовах для сполук у водному шарі.

Оскільки наявність змучених намулів та фітопланктону в воді впливає на розсіяння світла, необхідно враховувати їхню концентрацію при розгляді проходження світлового потоку крізь товщу води. Поширення сонячної радіації в воді описується за законом Ламберта-Бєєра. Потік сонячної радіації біля дна (на глибині H) буде мати вигляд:

$$I(H) = I_0 \cdot \exp(-K_d \cdot H), \quad (5)$$

де I_0 – потік сонячної радіації на поверхні водойми; K_d – коефіцієнт вертикального затухання світла. Згідно [4], величину K_d можна представити у вигляді

$$K_d = \frac{a_d}{\cos \theta} \sqrt{0.81 + 0.425 \cos \theta}, \quad (6)$$

де a_d характеризує оптичні властивості води, зокрема поглинання і розсіяння світла; θ – кут падіння сонячних променів. Співвідношення для I_0 та θ описані в [5].

В роботі [9] оптичні властивості води характеризуються поглинанням і розсіянням світла власне в воді, а також за рахунок наявності в воді змучених намулів і фітопланктону:

$$a_d = a_{dw} + a_{ds} + a_{dg}, \quad (7)$$

де індекс w відповідає воді, s – змученим намулам, g – фітопланктону. Величина a_{dw} в загальному випадку залежить від довжини світла, але в даній роботі згідно [8] було прийнято $a_{dw} = 0.5 \text{ м}^{-1}$ для середніх довжин у видимому діапазоні.

Концентрація змучених намулів S_d згідно [7] впливає на коефіцієнт затухання світла в шарі води наступним чином:

$$a_{ds} = c_s \cdot S_d, \quad (8)$$

де c_s – стала. В роботі [3] c_s знаходиться в проміжку $0.4\text{--}1.5 \text{ м}^{-1}\text{мг}^{-1}\text{л}$ і залежить від розмірів частинок намулу. Причому меншим розмірам частинок відповідає більше значення сталої.

Аналогічно до змучених намулів на коефіцієнт затухання світла впливає концентрація фітопланктону C_4 [7]:

$$a_{dg} = c_g \cdot C_4, \quad (9)$$

де c_g – стала, визначена в [7] в проміжку $1.7\text{--}2.5 \text{ м}^{-1}\text{мг}^{-1}\text{л}$.

3. ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ВЗАЄМОДІЇ ПЕРИФІТОНУ З ГІДРОДИНАМІКОЮ ВОДОЙМИ

В загальному випадку гідродинамічні процеси у водоймі знаходяться під впливом придонної рослинності. Зокрема це проявляється у зменшенні швидкостей течій, зміні структури течій та турбулентних процесів, що приводить до зміни швидкостей змучення і осадження намулів, а отже, змінює концентрацію змучених намулів у воді і, відповідно, коефіцієнт розсіяння світла в товщі води. В даній роботі вплив придонної рослинності на гідродинаміку водойми здійснюється через зміну коефіцієнта придонного тертя. Як було показано в [13], величина коефіцієнта придонного тертя залежить ще й від характеристик поверхневих хвиль, що є суттєвим для мілких водойм, коли турбулентні процеси, викликані хвилями, проникають на всю глибину водойми. Ця залежність у даній статті не розглядається.

Згідно [6], придонне тертя за рахунок рослинності на дні водойми залежить від густини її покриву. В роботі [2] цей підхід був узагальнений на широкий спектр густин придонної рослинності. Згідно цієї роботи, коефіцієнт придонного тертя C_{Dfull} можна представити у вигляді лінійної комбінації коефіцієнта тертя дна C_{DZ} і коефіцієнта тертя, пов'язаного з елементами (листяками, стеблами) придонних рослин C_{DP} . Отже,

$$C_{Dfull} = (1 - ad)C_{DZ} + \frac{1}{2}C_{DP} \cdot ad \frac{H}{pd}, \quad (10)$$

де ad – частина об'єму водойми, зайнята перифітоном,

$$ad = \left(pn \cdot pd \cdot \frac{ph}{H} \right) \cdot pd, \quad (11)$$

pn – кількість рослин на одиницю площі дна; pd – діаметр рослини; ph – висота рослини.

Оскільки в моделі всі придонні рослини вважаються однаковими, то pn можна знайти, маючи концентрацію перифітону C_P та вважаючи, що стебла рослин мають циліндричну форму:

$$pn = \frac{C_P}{\rho_P \cdot \frac{\pi \cdot pd^2}{4} \cdot ph}, \quad (12)$$

де ρ_P – густина рослин. Величини pd , ph і ρ_P є параметрами моделі і можуть приймати різні значення в різних водоймах, але в межах однієї водойми вони вважаються постійними величинами. Вираз для коефіцієнта тертя, пов'язаного з елементами придонних рослин, згідно [6, 2], має вигляд

$$C_{DP} = -0.255 \cdot \ln(ad). \quad (13)$$

Внесені в модель гідродинаміки зміни, пов'язані з наявністю перифітону, приводять до зростання коефіцієнта донного тертя, внаслідок чого зростає турбулентність у придонній області, а отже і змучення намулів. Але відомо, що наявність придонної рослинності зменшує інтенсивність змучення. Тому в формулу для визначення потоку змучення була внесена поправка у вигляді коефіцієнта ерозії Er , який приводить до зменшення величини змучення намулів у залежності від густини покриву дна перифітоном:

$$Er = 1 - C_{Er} \cdot ad, \quad (14)$$

де $C_{Er} = 3000$ – емпірична стала. В даній формулі використано безрозмірний параметр ad як величину, що характеризує концентрацію перифітону на дні.

4. МОДЕЛЬНІ РОЗРАХУНКИ

В даному розділі проведено моделювання ідеалізованого мілкого озера розміром 20 на 30 км. Глибина 90% озера не перевищувала 4 м. Інша частина озера мала глибину понад 10 м. Для розрахунків були вибрані періодичні метеоумови: літній день на широті 40° з середньою атмосферною температурою 22.4°C , вітром змінного напрямку і швидкістю в діапазоні 0.5 - 5.0 м/с, постійними хмарністю 0.49, вологістю 0.62 і атмосферним тиском 0.1 МПа. Для оцінки взаємодії гідродинамічної і

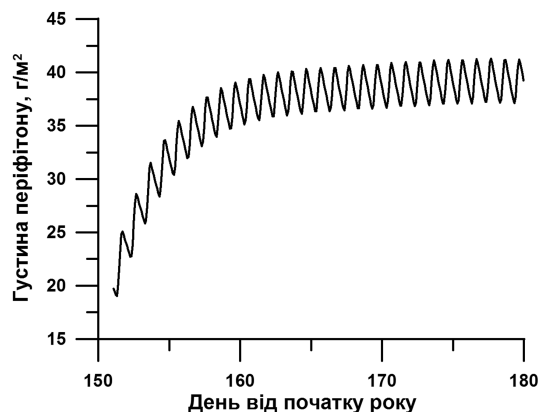


Рис. 2. Середня по дну озера густина перифітону для випадку 1

екологічної моделі було проведено два розрахунки: в першому використовувалася модель екодинаміки (випадок 1), а в другому (випадок 2) – ні.

На рис. 2 зображено середню по дну озера густину перифітону за місяць розрахунку. Видно, що після інтенсивного росту протягом кількох перших днів концентрація перифітону прямує до рівноважної для заданих у моделі кліматичних умов та біохімічних характеристик озера. Після цього ріст перифітону в денний час врівноважується відмиранням протягом доби.

На рис. 3 порівняно між собою середню по озеру густину кінетичної енергії течій $\frac{1}{2}\rho(U^2 + V^2)$ для обох випадків. Видно, що у випадку з наявністю перифітону на дні середня енергія течій менша, тобто, перифітон гальмує течії. Порівняння турбулентних характеристик показало, що для обох випадків енергія турбулентності практично однакова, тоді як величина швидкості дисипації турбулентної енергії у випадку з перифітоном дещо більша. Тобто, загальна енергія у випадку з перифітоном менша, ніж без перифітону. А оскільки при цьому турбулентна енергія однакова, то це свідчить про збільшення частки турбулентної енергії у випадку наявності перифітону.

На рис. 4 видно, що наявність перифітону знижує концентрацію змучених намулів за рахунок зменшення величини їхнього змучення.

ВИСНОВКИ

В даній роботі представлена модель взаємодії термодинамічних і біохімічних процесів у мілких водоймах, а також процесів переносу змучених намулів. Особливістю роботи є моделювання впливу змінної в просторі і в часі густоти перифітону,

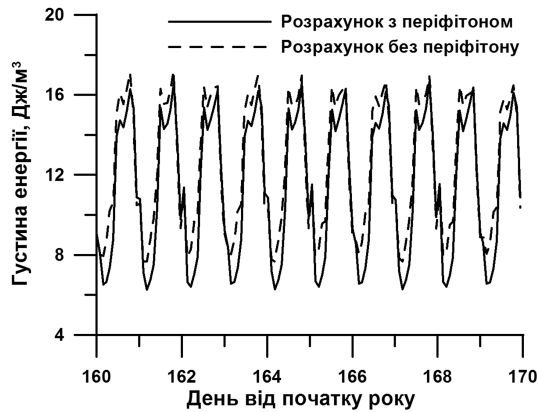


Рис. 3. Середня по озеру густина кінетичної енергії течій для розрахунків з перифітоном і без нього

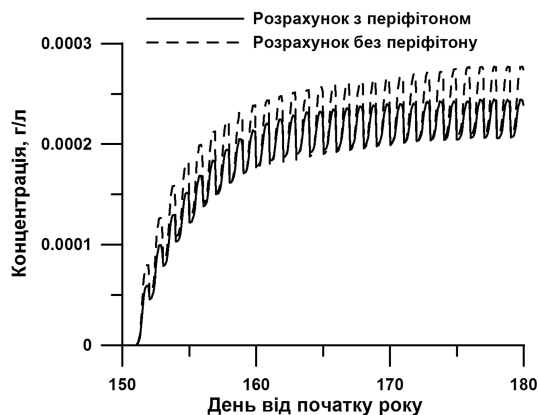


Рис. 4. Середня по озеру концентрація змучених намулів у воді для двох випадків

яка визначає величину придонної шорсткості, на гідродинаміку водойми. Приведено приклад розрахунку характеристик мілкої водойми з використанням описаного комплексу моделей. Показано, що наявність перифітону приводить до турбулізації водойми на фоні зменшення загальної кінетичної енергії.

Автор висловлює подяку докт. фіз.-мат. наук В.С. Мадеричу за наукове керівництво і корисні поради.

1. Ambrose R.B., Wool T.A., and Martin J.L. The water quality analysis simulation program WASP6. User Manual. – U.S. EPA: Athens, GA, 2001. – 267 p.
2. Chen S.N., Sanford L.P., Koch E.W., Shi F., North E.W. A nearshore model to investigate the effects of seagrass bed geometry on wave attenuation and suspended sediment transport // *Estuaries and Coasts*. – 2007. – **30**. – P. 296-310.
3. Hekkink A., Blom G. Observations and simulations of water-sediment heat exchange in a shallow coastal lagoon // *Estuaries*. – 2002. – **25**. – P. 483–487.
4. Kirk J.T.O. Attenuation of solar radiance in scattering absorbing waters, a simplified procedure for its calculation // *Appl. Optics*. – 1984, **23**. – P. 3737-3739.
5. Maderich V., Heling R., Bezhenar R., Brovchenko I., Jenner H., Koshebutsky V., Kusch A., Terletska K. Development and application of 3D numerical model THREETOX to the prediction of cooling water transport and mixing in the inland and coastal waters // *Hydrological Processes*. – 2008. – **22**. – P. 265–277.
6. Nepf H.M. Drag, turbulence and diffusion in flow through emergent vegetation // *Water Resources Research*. – 1999. – **35**. – P. 479-489.
7. Prieur L., Sathyendranath S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter and other particulate materials // *Limnol. Oceanogr.* – 1981. – **26**. – P. 671-689.
8. Smith R., Baker K. Optical properties of the cleanest natural waters // *Appl. Optics*. – 1981. – **20**. – P. 177-184.
9. Van Duin E.H.S., Blom G., Los J.M., Maffione R., Zimmerman R., Cerco C.F., Dortch M.S., Best E.P.H. Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth // *Hydrobiologia*. – 2001. – **444**. – P. 25-42.
10. Winterwerp J.C. On the dynamics of high-concentrated mud suspensions. – PhD Thesis: Delft University of Technology, Delft, Netherlands. – 1999 p. 204
11. Р. Беженар, В. Мадерич. Модель теплообміну водного шару і донних відкладень в мілкій водоймі // *Прикладна гідромеханіка*. – 2008. – **10(82) N3**. – С. 10-17.
12. И.А. Бровченко, В.С. Мадерич. Трехмерная лагранжская модель переноса многофракционных наносов и ее применение к описанию гравитационных течений // *Прикладна гідромеханіка*. – 2008. – **10(82) N2**. – С. 22-31.
13. В. Мадерич, Р. Беженар, И. Бровченко. Трехмерное моделирование взаимодействия волн и течений // *Прикладна гідромеханіка*. – 2010. – **12(84) N2**. – С. 20-25.