

УДК 57.04

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ВИДОБУВНИХ РОБІТ НА РИБНІ ЗАПАСИ

¹Шахман І.О. – к. геогр. н., доцент

²Бистрянцева А.М. – к. фіз.-мат. н.

¹ДВНЗ «Херсонський державний аграрний університет»

shakhman.i.a@gmail.com

²Херсонський державний університет

anbys@ukr.net

Проаналізовано вплив видобувних робіт на фізико-хімічні властивості води та водні біоресурси (рибу). Продемонстровано приклад застосування математичного моделювання до розв'язання еколого-економічних задач. Виконано побудову математичної моделі визначення об'ємів видобутку піску, які не спричинювали б довготривалі та невідновні порушення екологічної рівноваги. Застосовано одну з важливих властивостей автономної системи (моделі) зі стаціонарним розв'язком, який визначає стан рівноваги водної екосистеми. Наголошено на необхідності менеджерам спиратися на оцінку потенційних наслідків виробничої діяльності при проведенні днопоглиблювальних робіт, при яких рибне населення не втратило б здатності до саморегуляції та самовідновлення.

Ключові слова: рибні запаси, антропогенні фактори, видобуток піску, завислі речовини, математична модель, водна екосистема, еколого-економічні відносини.

Постановка проблеми. Основна ідея стійкого (збалансованого) розвитку світового суспільства, що була проголошена Організацією Об'єднаних Націй, – підвищення добробуту людства не шляхом потужного споживання природних ресурсів, а завдяки формуванню потреб населення відповідно до наявних природних ресурсів. Тому під час забезпечення економічних інтересів суспільства екологічна функція держави повинна бути спрямована на гармонізацію економічних та екологічних відносин господарської діяльності і природи, з безумовною перевагою саме екологічних. Впровадження економічного механізму природокористування повинно передбачати таке антропогенне навантаження на навколишнє середовище, яке не призводить до небажаних наслідків у біоті і до погіршення якості довкілля.

Корисні копалини місцевого значення (сапропель, гіпс, вапняк, крейда, пісок, суглинок, супісок) належать до невідновних природних ресурсів, геологічна швидкість утворення або акумуляції яких є значно меншою, ніж швидкість їх споживання людиною. Видобуток корисних копалин місцевого значення, зокрема піску, досить прибутковий бізнес.

Своєю чергою забір піщаної сировини наносить значну шкоду довкіллю. Планування видобутку піску в більшості робіт розраховується в кожному конкретному випадку окремо з виконанням загальної оцінки впливу на навколишнє середовище.

Видобуток піску супроводжується розробкою, переміщенням та відсипанням ґрунтів в воду, що призведе до руйнування певної ділянки водного об'єкту та появи зони з підвищеною каламутністю води. Надходження завислих речовин у воду (потужність і просторове розповсюдження забруднення води) визначається режимом видобувних робіт. Тому необхідно виконувати оцінку впливу негативних факторів під час видобутку корисних копалин з урахуванням зони розповсюдження шлейфу каламутності та розмірів збитків, заподіяних рибним запасам водойми. Шлейф каламутності, який формується в результаті проведення робіт з видобутку піску, буде складатися в основному з частинок (пісок, мул тощо), які водний потік підхоплює і уносить на певну відстань. Внаслідок різкого підвищення каламутності води при розробці та відсипанні ґрунту частина рибного населення покине зону виконання робіт у зв'язку з погіршенням умов існування. Молодші вікові групи риб, які більш чутливі (сприйнятливі) до дефіциту кисню і збільшення каламуті, внаслідок засмічення зябрового апарату завислими речовинами гинуть.

Прослідкувати за змінами екологічної рівноваги, реакцією окремих особин і всієї спільноти водної екосистеми, розгорнутої в часі та просторі, можна за допомогою математичних методів дослідження. Сьогодні існує досить широкий діапазон застосування математичного моделювання до розв'язання багатьох еколого-економічних задач. Навіть більше, досвід застосування математичного моделювання не викликає жодних сумнівів щодо ефективності цього методу при дослідженні та прогнозуванні стану природних екосистем в умовах антропогенного впливу [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завислі речовини утворюються як природним шляхом у весняний період і під час дощових паводків, так і від антропогенних факторів – під час будівництва мостів, облаштування дамб, розробки родовищ та інших робіт на водних об'єктах [2]. У всіх випадках утворюються зони підвищеної каламутності як короткочасні, так і довготривалі, а іноді постійні. При цьому суспензії різняться за концентрацією, структурою завислих речовин, тривалістю осадження та ступенем негативного впливу на живі організми. Завислі речовини зменшують прозорість води, інтенсивність фотосинтезу, сприяють швидкому нагріванню, що негативно впливає на цінні лососеві риби. Відбувається зміння хімізму вод, частина забруднюючих інгредієнтів переходить з пасивного стану в активний, загострюючи проблему чистої води, що вкрай негативно відображається на певних видах безхребетних

і риб в екосистемі. Стійкі підвищені концентрації суспензій часто супроводжуються зростанням вмісту в воді сполук азоту, фосфору, заліза, багатьох біогенних мікроелементів, що може привести до зникнення ряду ланок в ланцюзі живлення. Завислі речовини здійснюють негативний вплив на фізіолого-біохімічні параметри риб, імунну систему тощо [3].

Багатократно доведено негативний вплив завислих речовин високих концентрацій на склад фауни риб (заміна ценозів), структуру популяцій, чисельність, зябровий апарат риб [4; 5], ікру, личинки, мальків риб, морфологічні характеристики [6; 7], зростання, вгодованість, накопичення жиру, розмноження (зокрема на терміни, успішність нересту, темпи дозрівання статевих ознак, плодючість тощо), поведінку, паразитофауну та інші важливі показники риб.

Очікуване підвищення попиту на пісок в Китаї спричинило розгляд різноманітних сценаріїв впливу видобутку його на довкілля і поставило питання збереження біорізноманіття озер. Науковцями представлена стратегічна оцінка масштабів наслідків видобутку піску в озері Поянг (Китай) та запропоновані альтернативні варіанти видобутку з метою зменшення навантаження на екосистему озера [8].

Дослідження Izougarhane M. et al [9] надають якісну і кількісну оцінку ефективності промислу в гирлі річки Себу (Марокко) і оцінку її екологічного стану. Результати спостереження за 2005–2016 рр. вказують на зниження якісних та кількісних показників рибного промислу. Крім того, відмічається зміння фізичних характеристик водного об'єкту, а якість води водного середовища оцінюється як брудна та дуже брудна. Автор наголошує, що основною причиною деградації біорізноманіття водного об'єкту є днопоглиблювальні роботи.

Wilber D. H., Clarke D. G. [10] дослідили біологічні ефекти впливу завислих речовин, вміст яких збільшується в результаті проведення днопоглиблювальних робіт, на рибу і молюски в естуаріях річок і визначили необхідність проведення інтеграції біологічних вишукувань та інженерних досліджень. Запропоновано використання математичної моделі, що враховує вихідні дані концентрацій завислих речовин, зміння їх відповідно до масштабів проведення днопоглиблювальних робіт та реакцію водних організмів на зміння концентрації завислих речовин, як в районі проведення видобутку піску, так і за розповсюдженням плями каламутності вниз за течією до морських вод. Науковці узагальнили результати досліджень взаємозв'язків відгуку біоти (за таксономічними групами) на зміну концентрації завислих речовин відповідно до показників проектів з видобутку піску (потужності та тривалості впливу).

Kim C. S., Lim H. S. дослідили розповсюдження та акумуляцію завислих речовин під час видобутку морського піску в прибережних водах Кореї на

основі комбінованого підходу до спостережень і моделювання [11]. Науковці використали польові вимірювання, виконані під час робіт в Kyunggi Bay, Корея для розробки тривимірної (3D) моделі переміщення завислих речовин на основі Регіональної системи моделювання океану (ROMS). Модель працює, використовуючи реальні дані спостережень 9-ти кілометрової метеорологічної моделі з урахуванням параметрів морських припливів і річкового стоку. Отримані картини розподілу завислих речовин за глибиною та в просторі, відповідають даним натурних спостережень і демонструють характер розподілу відповідно до гранулометричного складу піску.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка математичної моделі, яка дозволить визначити об'єми видобутку піску, що не спричинювали б довготривалі та невідновні порушення екологічної рівноваги, а рибне населення не втратило б здатності до саморегуляції та самовідновлення.

Матеріали і методи досліджень. Механізми, що відповідають за розвиток природної системи, можуть бути визначені під час розгляду функціонування біологічної або екологічної системи як результат взаємодії їх складників та зовнішніх факторів, що відображається в зміні стану середовища, в якому розглядаються ці системи. Досконало дослідити взаємодію різноманітних чинників можна завдяки використанню математичних методів і методів математичного моделювання.

Результати досліджень. Найпростіший випадок управління динамікою популяції екосистеми реалізується, коли швидкість зміни популяції пропорційна відхиленню від її рівноважного стану N_0 (модель Мальтуса):

$$\frac{dN}{dt} = k(N - N_0). \quad (1)$$

Тут приріст популяції риб пропорційний їх наявній кількості. Розв'язок рівняння має вигляд: $N = N_0 + (N_1 - N_0) \cdot e^{kt}$, де N_1 – відхилення від рівноважного стану в час $t = 0$. Для $k > 0$ екосистема віддалятиметься від рівноважного стану N_0 , тоді як для $k < 0$ система повертатиметься до свого рівноважного стану. Швидкість віддалення чи наближення залежатиме від абсолютної величини керуючого параметру k . Лінійні моделі спрямовані на збереження системи в поточному стані, тоді як в екосистемі часто необхідно переводити систему з одного стану в інший, що є більш бажаним за певними критеріями. Переводити систему з одного стану в інший дозволяють нелінійні моделі [12].

Динаміка популяції може бути адекватно описана засобами однієї незалежної змінної, а фактори, які впливають на стан системи, враховані у вигляді заданих констант. Однією з нелінійних моделей, які дозволяють це зробити, є логістична модель, яка приймає вигляд наступного рівняння:

$$\frac{dN^*}{dt} = aN^* \left(1 - \frac{N^*}{K^*} \right), \quad (2)$$

де $N^*(t)$ – чисельність популяції в момент часу t , a – мальтузіанський параметр, K^* – екологічна ємність середовища [12].

Рівняння (2) інтегрується розділенням змінних, і його розв’язок, що визначає чисельність популяції в момент часу t , має вигляд:

$$N^* = \frac{K^* N_0 e^{at}}{K^* + N_0 (e^{at} - 1)}. \quad (3)$$

Модель Ферхюльста є узагальненням моделі Мальтуса на наявність обмежень на видобування природних ресурсів. При цьому управління квотою на видобуток піску має здійснюватися таким чином, щоб досягти максимального прибутку від видобування цього піску за умови його збереження для майбутнього використання, і цей видобуток не має виснажувати вилов риби в річці. Альтернативні моделі управління можуть включати видобуток піску з постійною швидкістю c у вигляді

$$\frac{dN^*}{dt} = aN^* \left(1 - \frac{N^*}{K^*} \right) - c,$$

або квота може визначатися пропорційно наявній кількості піску:

$$\frac{dN^*}{dt} = aN^* \left(1 - \frac{N^*}{K^*} \right) - p \cdot x,$$

де $p \cdot x$ задає швидкість видобутку піску [12].

Під час видобутку піску очікується тимчасовий вплив на іхтіофауну, який виражається в загибелі молоді риб та кормових організмів, що зумовлено збільшенням завислих речовин у поверхневих водах від проведення днопоглиблювальних робіт. Земснаряди формують зони з завислими речовинами значних концентрацій. Крім того, при гідровилученні ґрунту можуть засмоктуватися і гинути представники гідробіоти. В зоні підвищеної каламуті треба враховувати вплив завислих речовин як в товщі води, так і осідаючих на дно, що має особливо важливе значення для нерестовищ і місць нагулу молоді риб.

Реакція риби при видобутку піску (відгук біоти на антропогенний вплив) проявляється уходом дорослих особин за зону впливу земснаряду відразу після відчуття шуму і вібрації. Мальки, які ще не здатні до самостійного переміщення, та ікринки з дна і водної товщі будуть гинути відповідно до збільшення каламуті, тобто за умови безперервної роботи земснаряду протягом тривалого часу, що і може відповідати умові перевищення смертності над народжуваністю ($a < 0$).

Якщо виникає необхідність моделювання стану екосистеми або окремих її компонентів при змінних у часі зовнішніх умовах, то задача зводиться до розгляду неавтономної системи. При цьому спочатку будується і досліджується автономна система (модель) [1].

Відповідно до методики розрахунку збитків [13], які заподіяні рибному господарству внаслідок проведення робіт з видобутку ґрунту, збитки від попадання ікри, личинок і молоді риб в рефулер земснаряда визначаються за формулою:

$$N = \Pi VR \frac{K}{100} M, \quad (4)$$

де N – розмір збитків, Π – кількість ікри, личинок, молоді риб, V – об'єм вибраного ґрунту, R – кратність розбавлення ґрунту водою, K – коефіцієнт промислового повернення від ікри, M – середня маса дорослої особини.

Для визначення чисельності популяції (ікри, личинок, молоді риб), яка є достатньо великою, зручніше використовувати не детерміновані, а неперервні моделі, які мають незалежну змінну часу $t \in R$. За відсутності інших незалежних змінних вона описується звичайними диференціальними рівняннями.

Приймаючи, що $\Pi = N^*$ з рівностей (3), (4), отримуємо:

$$N = \frac{K^* N_0 e^{at}}{K^* + N_0 (e^{at} - 1)} \cdot VR \frac{K}{100} M.$$

Відокремивши величини, які є незалежними від t , маємо:

$$N(t) = K^* N_0 RM \frac{K}{100} \cdot \frac{V(t) e^{at}}{K^* + N_0 (e^{at} - 1)}. \quad (5)$$

Отримане рівняння (5) представляє собою залежність, яка описує автономну систему.

Одна з важливих властивостей автономної системи (моделі) полягає в тому, що вона може мати стаціонарні розв'язки, які визначають стан рівноваги реальної екологічної системи. Необхідно знайти точки, які відповідають стану рівноваги автономної системи (моделі). В стані рівноваги всі показники екосистеми не змінюються в часі, тому в стаціонарному стані всі похідні за часом у системі дорівнюють нулю, тобто $\frac{dN}{dt} = 0$:

$$\frac{dN}{dt} = K^* N_0 RM \frac{K}{100} \cdot \frac{\left(\frac{dV}{dt} e^{at} + a V e^{at} \right) (K^* + N_0 (e^{at} - 1)) - V e^{at} \cdot N_0 a e^{at}}{(K^* + N_0 (e^{at} - 1))^2}.$$

Оскільки $\frac{dN}{dt} = 0$, $K^* + N_0 (e^{at} - 1) \neq 0$, то

$$\left(\frac{dV}{dt} e^{at} + a V e^{at} \right) (K^* + N_0 e^{at} - N_0) - a V N_0 e^{2at} = 0;$$

$$\frac{dV}{dt} e^{at} (K^* + N_0 e^{at} - N_0) + K^* a V e^{at} + a V N_0 e^{2at} - N_0 a V e^{at} - a V N_0 e^{2at} = 0;$$

$$\frac{dV}{dt} e^{at} (K^* + N_0 e^{at} - N_0) + K^* a V e^{at} - N_0 a V e^{at} = 0 .$$

З урахуванням, що $e^{at} \uparrow 0$, а $t \in R$, маємо:

$$(K^* + N_0 e^{at} - N_0) \frac{dV}{dt} + (K^* a - N_0 a) V = 0 .$$

В результаті знаходження похідної (5) і прирівнюючи результат до нуля, отримуємо диференціальне рівняння відносно $V'(t)$ або $\frac{dV}{dt}$:

$$(K^* - N_0 + N_0 e^{at}) \frac{dV}{dt} = a(N_0 - K^*) V . \quad (6)$$

Рівняння (6) інтегрується розділенням змінних:

$$\frac{dV}{V} = a \cdot \frac{N_0 - K^*}{K^* - N_0 + N_0 e^{at}} dt .$$

В результаті його інтегрування отримуємо:

$$V = e^{-at + \ln(K^* - N_0 + N_0 e^{at})} \quad \text{або} \quad V = (K^* - N_0 + N_0 e^{at}) e^{-at} .$$

Отже, розв'язок рівняння, що визначає об'єм видобутого піску в момент часу t , має вигляд:

$$V(t) = \frac{K^* + N_0 (e^{at} - 1)}{e^{at}} . \quad (7)$$

Було виконано теоретичне обґрунтування можливого застосування математичної моделі на прикладі видобутку піску в Каховському водосховищі з розрахунком кількісних показників (площі, об'ємів, тривалості видобутку), які забезпечать збереження екологічної стійкості водного об'єкту, а отже здатності рибних ресурсів до саморегуляції та самовідновлення [14]. Пригнічення іхтіофауни в районі видобутку піску буде мати локальний та тимчасовий характер, і через деякий час відбудуться процеси природної рекультивациі організмів донної фауни. Відновлення кормової бази після завершення видобутку піску здійсниться протягом певного часу. Потім доросла риба повернеться (деякі види риб навіть при незначних показниках каламуті), і процес народжуваності з часом відновиться.

Висновки. Результати досліджень науковців доводять необхідність розробки запобіжних і обґрунтованих рекомендацій, які можна отримати за допомогою математичних моделей. Дослідники наголошують на необхідності менеджерам спиратися на оцінку потенційних наслідків виробничої діяльності при проведенні днопоглиблювальних робіт. Використовуючи системний аналіз, комп'ютерне моделювання, вдається глибше дослідити механізм антропогенного перетворення водних об'єктів, розробити правдоподібні сценарії можливого розвитку наслідків впливу водогосподарської діяльності людини (відгук біоти) на стан водних ресурсів у відповідності до планів економічного розвитку регіонів, які б забезпечили гармонійне поєднання екологічних та економічних інтересів суспільства.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ДОБЫВАЮЩИХ РАБОТ НА РЫБНЫЕ ЗАПАСЫ

¹*Шахман И.А.* – кандидат географических наук, доцент,
²*Быстрянцева А.Н.* – кандидат физико-математических наук,
¹ГВУЗ «Херсонский государственный аграрный университет»,
shakhman.i.a@gmail.com

²*Херсонский государственный университет, anbys@ukr.net*

Выполнен анализ влияния работ по добыче песка на физико-химические свойства воды и водные биоресурсы (рыбу). Продемонстрирован пример применения математического моделирования к решению эколого-экономических задач. Выполнено построение математической модели определения объёмов добычи песка, которые не вызвали бы продолжительные и необратимые нарушения экологического равновесия. Применено одно из важных свойств автономной системы (модели) со стационарным решением, которое определяет состояние равновесия водной экосистемы. Отмечена необходимость менеджерам опираться на оценку потенциальных последствий производственной деятельности при проведении дноуглубительных работ, при которых рыбное население не утратило бы способности к саморегуляции и самовосстановления.

Ключевые слова: рыбные ресурсы, антропогенные факторы, добыча песка, взвешенные вещества, математическая модель, водная экосистема, эколого-экономические отношения.

MATHEMATICAL MODEL OF ASSESSMENT THE IMPACT OF EXTRACTION WORKS ON FISH STOCKS

¹*Shakhman I.A.* – Candidate of Geographical Sciences, Docent
²*Bystriantseva A.N.* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences
¹*Kherson State Agricultural University, shakhman.i.a@gmail.com*

²*Kherson State University, anbys@ukr.net*

The analysis of the effect of sand extraction on the physicochemical properties of water and aquatic bioresources (fish) was performed. An example of the application of mathematical modeling to the solving of environmental and economic problems was demonstrated. The construction of a mathematical model for determining the volume of sand extraction, which would not cause long-lasting and irreversible disruption of ecological equilibrium, was carried out. One of the important properties of an autonomous system (model) with a stationary solution that determines the equilibrium state of the aquatic ecosystem was applied. The need for managers to rely on the assessment of the potential consequences of production activities during dredging, in which fish populations would not lose their ability to self-regulate and self-repair, was noted.

Key words: fish resources, anthropogenic factors, extraction of sand, suspended substances, mathematical model, aquatic ecosystem, ecological-economic relations.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лаврик В.І. Методи математичного моделювання в екології. К.: Видавничий дім «КМ Академія», 2002. 203 с.
2. Зиновьев Е.А., Китаев А.Б. О воздействии взвешенных частиц на гидрофауну. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Самара. 2015. Том 17, №5. С. 283–288.
3. Лукьяненко В.И. Общая ихтиотоксикология. М.: Пищевая промышленность, 1983. 320 с.
4. Андроников С.Б. Методика определения токсичности водной среды по изменению жаберного аппарата рыб / С.Б. Андроников, Э.В. Иванов, Т.М. Лукина, И.С. Шестерин. Гидробиологический журнал. 1987. Вып. 23, №3. С. 92–95.
5. River B. Habitat modifications and Freshwater fish / B. River, J. Segulier Proc. Symp. Enr. Inland fish. Adv. Comiss. Aarchus. 23-25 May. 1984. London et al., 1985. P. 131–146.
6. Mallatt, J. Fish gill structural changes induced by toxicants and others irritants: a statistical review Can. J. Fish and Aquat. Sci. 1985. 42. № 4. P. 630–648.
7. Wildish, D.I. Avoidance of suspended sediments by smelt as determined by a new “single fish” behavioral bioassay / D.I. Wildish, I. Power // Bul. Environ. Contam. and Technol. 1985. 34. №5. P. 770–774.
8. de Leeuw J. et al. Strategic assessment of the magnitude and impacts of sand mining in Poyang Lake, China. Regional Environmental Change. 2010. Vol. 10. № 2. P. 95–102.
9. Izougarhane M. et al. Impact of sand dredging on the coastal and artisanal fishing in estuary Sebou (Morocco) Biolife. 2016. Vol. 4. №4. P. 661–667.
10. Wilber D.H., Clarke D.G. Biological effects of suspended sediments: a review of suspended sediment impacts on fish and shellfish with relation to dredging activities in estuaries. North American Journal of Fisheries Management. 2001. Vol. 21. №4. P. 855–875.
11. Kim C.S., Lim H.S. Sediment dispersal and deposition due to sand mining in the coastal waters of Korea. Continental Shelf Research. 2009. Vol. 29. № 1. P. 194–204.
12. Разжевайкин В.Н. Анализ моделей динамики популяций. М.: МФТИ. 2010. 174 с.
13. Наказ Міністерства Охорони навколишнього середовища та ядерної безпеки України № 36 від 18.05.1995 «Про затвердження Методики розрахунку збитків, заподіяних рибному господарству внаслідок порушення законодавства про охорону навколишнього природного середовища». URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z0155-95>.

14. Vitaliy Kobets, Anastasiia Bystriantseva and Iryna Shakhman GIS Based Model of Quotas Regulation and its Impact on the Extraction of Ecosystems' Natural Resources and Social Welfare. ICTERI 2018 ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. Proceedings of the 14th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. Volume I: Main Conference. Kyiv, Ukraine, May 14-17, 2018. Vol-2105. urn:nbn:de:0074-2105-4 P. 151–166