

ЕКОЛОГІЯ ГІДРОСФЕРИ

УДК 627.132:504.06:330.131.

*Атаєв С. В.**Рівненська філія ПВНЗ**«Європейський університет», м. Рівне***ЗМІНИ МУТНОСТІ ВОДИ ПРИ ЗВЕДЕННІ БЕРЕГОУКРІПЛЮВАЛЬНИХ СПОРУД ЯК ФАКТОР ВПЛИВУ НА ЖИТТЄДІЯЛЬНІСТЬ ГІДРОБІОНТІВ РІЧКИ**

На основі результатів прогнозування мутності води на ділянці р. Горинь, що підлягає укріпленню, встановлено, що зведення та експлуатація берегоукріплювальних споруд можуть порушувати природну динаміку мутності води по живому перерізу і довжині річки. Проаналізовано можливу реакцію гідробіонтів на зміни мутності води в районі кріплення.

Ключові слова: берегоукріплювальні споруди, мутність води, транспортуюча здатність потоку, мутність змиву, донна мутність, профіль мутності.

На основе результатов прогнозирования мутности воды на участке р. Горынь, подлежащего укреплению, установлено, что возведение и эксплуатация берегоукрепительных сооружений могут нарушать естественную динамику мутности воды по живому сечению и длине реки. Проанализирована возможная реакция гидробионтов на изменения мутности воды в районе укрепления.

Ключевые слова: берегоукрепительные сооружения, мутность воды, транспортирующая способность потока, мутность смыва, донная мутность, профиль мутности.

Based on the prediction of turbidity in the area of the river Gorin to be strengthening, it was found that the construction and operation of bank facilities can disrupt the natural dynamics of turbidity on the living section and length of the river. It analyzes the possible response of aquatic organisms to changes in water turbidity in the area of attachment.

Keywords: coast-protecting structures, turbidity of water, transporting ability of stream, turbidity of rocketing, ground turbidity, profile of turbidity.

Постановка проблеми. Мутність води у річках формується в результаті складної взаємодії між берегом, водою та наносами. Вона постійно змінюється у просторі і часі, залежить від режиму та розмиваючої здатності водного потоку [7, 5, 10]. Потік річки є несталим і просторово неоднорідним, він здатний переносити тверді частинки (наноси) та змінювати свої межі, що призводить до змін мутності води.

Для мутності річкової води характерна своя динаміка, що обумовлена не лише природними факторами, але і наслідками антропогенної діяльності [1]. Одним із факторів впливу на природну динаміку мутності річкової води є зведення та експлуатація берегоукріплювальних споруд. Берегоукріплювальні споруди можуть трансформувати режим та розмиваючу здатність водного потоку, сповільнювати або прискорювати його швидкість, насичувати або освітлювати наносами різної гідравлічної крупності. При цьому реакція гідробіонтів на зміни мутності води може бути різною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш чутливими до змін мутності води є багатоклітинні водорості та вища водна рослинність річкових біоценозів [9]. Зважені наноси в результаті механічного переміщення мас ґрунту, що складають ложе та береги річки, відносяться потоком води за межі від місця проведення гідротехнічних робіт і осідають на великій площі, замулюючи і частково знищуючи донну рослинність.

Підвищена мутність води помітно знижує проникнення світла та призводить до погіршення умов фотосинтезу занурених макрофітів. Загалом, тривалість дії підвищеної мутності води має вирішальне значення для занурених макрофітів. Зокрема, порогова мутність води для макрофітів *Batrachium circinatus*, *Potamogeton*, *Elodea nutteli*, дія якої може призвести до різкого зниження їх продуктивності, складає 0,01-0,02 кг/м³ [9].

Досить чутливим до підвищеної мутності води є фітопланктон. В результаті зростання мутності річкової води змінюється видовий склад фітопланктону [6]: заміна домінуючих форм у складі діатомових водоростей (*Bacillariophyta*) (планктонних – бентосними), різке зростання ваги монадних форм із синьо-зелених водоростей (*Cyanobacteria*). При мінімальному підвищенні мутності води (0,005-0,008 кг/м³) спостерігається зростання біомаси фітопланктону до порогового значення мутності 0,81 кг/м³; мутність води вище за 0,81 кг/м³ сприяє різкому зниженню первинної продукції фітопланктону.

Одним із компонентів зоопланктону річок, що відіграє значну роль у харчуванні іхтіофауни та самоочищенні води, є планктонні ракоподібні-фільтратори (*Molna brachiata*, *Ceriodaphnia pulchella*, *C. af finis Lilldeborg*, *Daphnia magna Straus*). В результаті проведених досліджень в районі днопоглиблювальних та русловипрямляючих робіт було встановлено [2]: середня добова летальна величина мутності води для ракоподібних складає 6,4 кг/м³; при мутності води 1,6-3,2 кг/м³ ракоподібні гинуть на п'яту добу; при мутності води більше 0,8 кг/м³ їх ріст та розмноження пригнічуються.

По різному реагує на зміни мутності води в районі зведення споруд іхтіофауна.

Більш детально вивчена реакція іхтіофауни на зміни мутності води у гірських річках [3, 4, 11]. Зокрема, у роботі [11] досліджувався вплив випрямлення річок на кормову базу та активність лососевих (*Salmonidae*). При значеннях мутності води 0,01-0,03 кг/м³ активність лососевих різко падала. У дослідженнях [3] було встановлено, що в результаті появи хмар замуленості, викликаних гідротехнічним будівництвом, змінюються морфологічні параметри будови тіла харіусових (*Thymallidae*), а допустимим значенням мутності є 0,015 кг/м³. При мутності води більше 0,04 кг/м³ у річках формується безрибна зона [4].

Менше висвітлена у науковій літературі проблема впливу динаміки мутності води на активність та фізіологію іхтіофауни рівнинних річок. Виділяється екологічна роль твердих фракцій водного потоку розмірами 0,1-100 мм (пісок, гравій, галька), що формують донну мутність річок [8]. По мірі зменшення донної мутності води у річках спостерігається зменшення кормової бази та іхтіомаси. Збільшення частки руслових фракцій у зважених наносах призводить до руйнації нерестилищ, а в окремих випадках (при донній мутності води більше 0,25 кг/м³), відбувається загибель іхтіофауни [4]. Особливий вплив на активність та міграцію іхтіофауни мають басейнові фракції, оскільки більшість водотоків сформувались в умовах низької природної мутності (менше 0,01 кг/м³) [7, 10]. Для ділянок водотоків з мінімальною мутністю води зведення та експлуатація берегоукріплювальних споруд можуть сприяти зростанню іхтіомаси за рахунок збільшення частки басейнових фракцій. Оптимальним діапазоном мутності води для іхтіофауни фахівці вважають мутність 0,15-0,65 кг/м³. Мутність води більше за 0,65 кг/м³ може призводити до зниження іхтіомаси, загибелі ікри, ушкодження зябер молоді та порушення функції дихання [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Руйнування берегової лінії, як наслідок розмиваючої дії водного потоку, має негативний вплив на об'єкти народного господарства, інженерні мережі, транспортну інфраструктуру і т.д. Оскільки більшість населених пунктів розташовані в районі водотоків, загроза руйнування берегової лінії може призводити до виникнення надзвичайних ситуацій та побутового травматизму. Необхідність укріплення берегів річок обумовлюється також небезпеками для руслових біотопів. Руйнація берегів призводить до змиву родючих ґрунтів, зміни умов

міграції живих організмів, зменшення ареалів зростання наземної та водної рослинності тощо.

Берегоукріплювальні роботи, з однієї сторони, припиняють процес руйнації берегів річки та зменшують збитки від негативної дії води. За рахунок кріплення берегів різкі коливання мутності води на окремих ділянках водотоку припиняються, що сприяє більш оптимальній реакції гідробіонтів на зміни водного середовища. З іншої сторони, зведення берегоукріплювальних споруд може змінювати динаміку мутності водного потоку за рахунок днопоглиблення та випрямлення русла, появи штучних каналів, стиснення потоку води спорудами тощо. На практиці інженерного захисту берегової лінії річок може виникати двояка ситуація: захисні споруди зменшують мутність води за рахунок припинення розмиву берега, покращуючи або погіршуючи умови існування гідробіонтів; ці ж споруди можуть трансформувати руслові процеси, порушуючи природну динаміку мутності води. Порівняння можливої реакції гідробіонтів на прогнозовані зміни мутності води при берегоукріпленні річок з реакцією на фонову мутність води можуть свідчити про рівень загроз для гідробіонтів в районі зведення берегоукріплювальних споруд.

Постановка завдання. У даній статті на прикладі реалізації комплексу заходів по захисту ділянки берегової лінії р. Горинь досліджено закономірності тимчасових та постійних змін мутності водного потоку по живому перерізу і довжині річки у створі споруд та вниз за течією річки. На основі прогнозу змін мутності води в районі споруд проаналізовано можливу реакцію гідробіонтів на зміни водного середовища та зроблено висновки щодо безпечності берегоукріплення ділянки річки з екологічної точки зору.

Виклад основного матеріалу. Процес формування русла річки реалізується через транспортуючу здатність водного потоку P_s (кг/с) [5]:

$$P_s = k \frac{v_{cp}}{HU}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт;

v_{cp} – середня швидкість водного потоку, м/с;

U – середня гідравлічна крупність наносів, м/см;

H – глибина водного потоку, м.

Значення коефіцієнта k розраховується за залежністю:

$$k = \frac{1}{1 - \Gamma}, \quad (2)$$

де Γ – гідромеханічний параметр наносів [1, 5].

Якщо транспортуюча здатність водного потоку P_s не реалізована, тобто, має місце його недовантаження наносами, тоді взаємообмін між наносами і руслом річки стає незбалансованим, тобто, мутність змиву наносів $S_{взм}$ (кг/м³) переважає над процесом їх осідання:

$$S_{взм} = 0,15N\eta^2 \frac{v_{cp}^2}{H}, \quad (3)$$

$$N = \frac{MC}{g}, \quad (4)$$

$$\eta^2 = \frac{0,53C - 4,1}{C - 2}, \quad (5)$$

$$M = 0,7C + 6, \quad (6)$$

де N – функція коефіцієнта Шезі C , м^{1/2}/с;

M – функція коефіцієнта Шезі C , $m^{1/2}/c$;

C – коефіцієнт Шезі, $m^{1/2}/c$;

g – прискорення вільного падіння, $9,8 \text{ м/с}^2$;

η – співвідношення донної швидкості водного потоку до середньої.

При зростанні витрат наносів на ділянках річок спостерігається розмив русла. Розмив призводить до збільшення глибини водного потоку H і, відповідно, зменшення його швидкості v_{cp} та транспортуючої здатності P_S . При досягненні рівного співвідношення між витратами наносів і транспортуючою здатністю водного потоку P_S розмив припиняється. При замуленні формується обернена ситуація: процес осідання наносів призводить до зменшення глибини водного потоку H і викликає збільшення його швидкості v_{cp} і транспортуючої здатності P_S . Коли транспортуюча здатність досягає фактичного значення витрат наносів, процес замулення припиняється.

Важливим показником динаміки мутності водного потоку по живому перерізу річки є донна мутність води S_H [5]:

$$S_H = S_{взм} \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{взмi}}{100} \Phi_i, \quad (7)$$

$$\alpha_{взмi} = \frac{\alpha_{днi}}{\mu_{взв}}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_i = \frac{u_i}{\omega}, \quad (9)$$

$$\omega = \frac{v_{cp}}{\sqrt{N}}, \quad (10)$$

де m – число зважених фракцій;

$\alpha_{взмi}$ – процентний вміст наносів i -ої фракції у складі мутності змиву (зваженої частини донних наносів);

$\alpha_{днi}$ – процентний вміст наносів i -ої фракції у складі донних наносів;

Φ_i – функція взаємообміну i -ої фракції по Караушеву, що залежить від величини ε_i ;

$\mu_{взв}$ – коефіцієнт зважування наносів; u_i – гідравлічна крупність наносів i -ої фракції, m/cm ;

ω – характеристика пульсацій турбулентних потоків.

Для комплексного аналізу мутності води у створі річки використовують залежність Макавєєва [5], що дозволяє визначити середню концентрацію наносів S з гідравлічною крупністю U на глибині y від поверхні водного потоку:

$$S = S_H \exp \frac{2C}{g} \frac{U}{v_{cp}} \left(1 - \frac{y}{H}\right). \quad (11)$$

Загальна закономірність розподілу мутності у створі річки виражається експоненціальною кривою – епюрою (рис. 1), що характеризує зменшення мутності від дна до поверхні водного потоку. Значний вплив на розподіл мутності мають місцеві умови. При однакових гідравлічних умовах та складі наносів виявляється, що еюра перевантаженого наносами водного потоку дає менш інтенсивне зменшення мутності до поверхні, чим для недовантаженого, еюра рівномірного розподілу займає проміжне положення між перевантаженим і недовантаженим наносами потоками води (рис. 1).

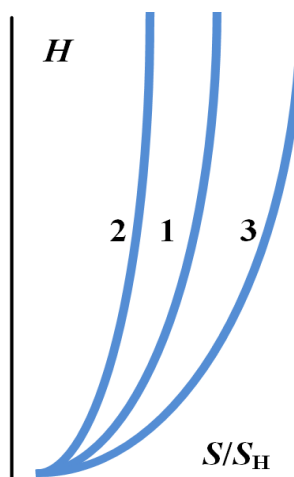
Для визначення мутності води по довжині незначної ділянки річки P_{SI} , яка представлена окремими блоками Δx (м), скористаємося наступною залежністю [1]:

$$P_{SI} = P_{Sx} + (P_{So} - P_{Sx}) \exp \frac{-B(U+k)\Delta x}{Q}, \quad (12)$$

де P_{Sx} і P_{So} – транспортуюча здатність водного потоку у створах річки у кінці та на початку розрахункового блоку Δx , кг/с;

B – середня ширина річки, м;

Q – середні витрати води, що проходять через розрахунковий блок Δx , м³/с.



1 – насичений потік; 2 – недовантажений потік; 3 – перевантажений потік

Рис. 1. Загальний вигляд епюри вертикального розподілу безрозмірної мутності води

Берегоукріплювальні роботи можуть змінювати розподіл мутності водного потоку за рахунок його стиснення [4], що призводить до зростання рівнів води у річці ΔH :

$$\Delta H = 2 \frac{Q_{ст}}{Q_{п}} \left(1 + \frac{Q_{п}}{Q_{п}} - \frac{Q_{п} v_{пов}}{v_{ст} Q_{п}} \right) \frac{\alpha_k v_{ст}^2}{2g}, \quad (13)$$

де $Q_{ст}$ і $Q_{п}$ – витрати води у річці, що проходять через створ у місці кріплення при стиснутому і побутовому стоках води, відповідно, м³/с;

$Q_{п}$ – середньорічні витрати води у річці, м³/с;

$v_{пов}$ – швидкість течії річки при проходженні повені, м/с;

$v_{ст}$ – швидкість стиснутого потоку води в районі кріплення, м/с;

α_k – коефіцієнт Коріоліса, 1,05.

Мутність води у річках при укріпленні берегової лінії може змінюватися в результаті виправлення русла. Берегоукріплювальні роботи на час їх проведення передбачають захист розмитої ділянки річки шляхом зведення земляних захисних споруд та тимчасового пониження рівнів води. В період будівництва такі ділянки водотоків не приймають участі у транспортуванні наносів, цю функцію виконують незакріплені русловиправляючі земляні канали, які, в свою чергу, змінюють транспорт наносів [1]. На практиці берегоукріплення ліквідація таких каналів не вигідна з економічної точки зору. Постійна експлуатація обвідних каналів може призводити до зміни параметрів водного потоку не лише у створі берегоукріплювальних споруд, але і вниз за течією річки.

Мутність водного потоку може змінюватися і при наявності перешкод вниз за течією річки від місця проведення гідротехнічних робіт. В районі таких перешкод, наприклад, мостових опор, розподіл мутності відрізняється від побутового стоку річки. Стиснення потоку води опорами призводять до зміни його швидкості v_{cp} і глибини H_{np} [1]:

$$v_{cp} = \left(\lg \frac{8,8H_{cp}}{U_{max}} \right) \sqrt{\frac{2g(\rho_s - \rho)U}{1,75\rho}}, \quad (14)$$

$$H_{np} = \left(\frac{mh_{поб}^{1,7}}{0,68U^{0,28}\beta} \right)^{\frac{1}{1+x}}, \quad (15)$$

$$m = \frac{Q_{max}}{H_{cp}^{1,7} B_m \mu_{ст}}, \quad (16)$$

де H_{cp} – середня глибина у річці, м;

U_{max} – максимальна гідравлічна крупність наносів, м/см;

ρ_s і ρ – густина твердих частинок і води, кг/м³;

$h_{поб}$ – середня глибина річки під мостовими опорами, м;

x – показник, що змінюється в залежності від крупності наносів U , 0,44-0,29;

β – коефіцієнт, що враховує максимальні витрати води Q_{max} , на проходження яких розрахований міст, 0,86-1,12;

B_m – ширина річки в районі моста, м;

$\mu_{ст}$ – коефіцієнт стиснення водного потоку.

Досить актуальною і складною залишається проблема визначення зони нормалізації мутності води – ділянки водотоку вниз за течією від місця укріплення берега, мутність якої наближається до побутового стану річки. В залежності від рівня антропогенного освоєння така зона може формуватися на відстані до декількох кілометрів [4].

Для прогнозування змін мутності води річки по живому перерізу та довжині в районі зведення берегоукріплювальних споруд та вниз за течією можна скористатися залежностями (1)-(12), але при отриманні таких оцінок необхідно враховувати зміни параметрів потоку за залежностями (13)-(16).

Розглянемо процедуру прогнозування змін мутності водного потоку на прикладі зведення берегоукріплювальних споруд на р. Горинь (рис. 2). Досліджувану ділянку водотоку загальною довжиною 1,8 км було розбито на 6 розрахункових блоків Δx : блок 1 – 228 м, блок 2 – 356 м, блок 3 – 256 м, блок 4 – 360 м, блок 5 – 365 м, блок 6 – 260 м. Кожен блок використовувався для прогнозування змін мутності води по довжині річки, при цьому у створах, які визначали початок і кінець блоку, розраховувались зміни вертикального розподілу мутності води. Розрахункові блоки 2 і 3 – це ділянки річки, де безпосередньо виконувались гідротехнічні роботи. Створ річки, розташований між блоками 2 і 3, був розрахунковим створом берегоукріплювальних споруд. В якості кінцевого створу блоку 3 було використано місце розташування мостового переходу.

Спочатку розраховували коефіцієнт Шезі C для створів річки [5]:

$$C = \frac{v_{cp}}{\sqrt{HI}}, \quad (17)$$

де I – ухил річки, м/км.

За даними багаторічних гідрологічних спостережень глибини у р. Горинь розподіляються нерівномірно: на плесах – 1,4-2,5 м, місцями до 5-11 м, на перекатах

зменшуються до 0,3-1 м. Середня швидкість річки на плесах складає 0,1-0,3 м/с, на перекатах – 0,5-1,3 м/с. Приймаємо, що величина H для ділянки водотоку на плесах та перекатах становить, відповідно, 2,5 і 0,8 м. Величина середньої швидкості потоку v_{cp} на плесах складає 0,25 м/с, на перекатах – 0,8 м/с. Ухил водотоку по ділянці річки I приймається 0,33 м/км.



Рис. 2. Схематичне розташування створів та розрахункових блоків ділянки р. Горинь, де прогнозувалися зміни мутності

При зведенні берегоукріплювальних споруд врахуємо ефект стиснення водного потоку у їх створі та в районі мостових опор.

За залежністю (13) визначимо глибину ΔH . Середньорічні витрати води у річці Q_p складають 26,3 м³/с. Витрати води у річці, що проходять через створ споруд, при стиснутому Q_{ct} і побутовому $Q_{п}$ стоках води, приймалися, відповідно, 53,6 і 43,8 м³/с. Швидкість течії річки при проходженні повені $v_{пов}$ та в районі споруд v_{ct} складає 2,4 і 1,3 м/с, відповідно. Таким чином, $\Delta H = 0,14$ м.

Надалі можна припустити, що підняття рівнів води у створі споруд викликати збільшення глибини потоку H у створах вниз за течією річки:

$$H = H_{cp} + \Delta H . \quad (18)$$

За залежностями (15)-(16) розрахуємо глибину стиснутого мостовими опорами водного потоку H_{np} . Мостовий перехід розрахований на проходження максимальних витрат води 1% забезпеченості $Q_{max} = 88,0$ м³/с. Ширина річки в районі моста $B_m = 39$ м, а коефіцієнт стиснення потоку $\mu_{ct} = 1,5$. Значення m за залежністю (16) становитиме 0,47.

Визначимо гідравлічну крупність наносів U та u_i .

Для всіх створів досліджуваної ділянки водотоку враховували зважені фракції наносів лише трьох груп ($m=3$): дрібні наноси ($d=0,003$ мм, $u_i=0,005$ м/см), середні наноси ($d=0,2$ мм, $u_i=3$ м/см) та великі наноси ($d=1,0$ мм, $u_i=6$ м/см). Середня гідравлічна крупність наносів U у створах визначалась за наступною залежністю:

$$U = 1,22 \sqrt{(\rho_s - \rho / \rho)gd} , \quad (19)$$

де d – середній діаметр частинок, мм.

Приймаємо, що середня гідравлічна крупність частинок для створів водотоку становить $U = 1,04$ м/см при умові, що їх густина $\rho_s = 2,65 \cdot 10^3$ кг/м³ та середній діаметр $d=0,045$ мм однакові. Глибина стиснутого мостовими опорами потоку води за залежністю (15) складатиме $H_{np} = 3,20$ м, а з врахуванням залежності (18) – $H_{np} = 3,34$ м.

Якщо стиснення водного потоку сприятиме збільшенню глибини H вниз за течією річки, то виправлення русла обвідним каналом буде зменшувати його швидкість v_{cp} . Справедливою є точка зору, що у місці з'єднання русла річки із каналом процеси акумуляції наносів переважають, а у місці виходу каналу – зменшуються. Спостерігається розмив, який призводить до збільшення глибини потоку H і, відповідно, зменшення його швидкості v_{cp} . Зупинимося на прогнозуванні змін швидкості потоку v_{cp} , процесом розмиву та зміною глибини потоку H в районі виходу каналу знехтуємо.

Зміну швидкості водного потоку v_{cp} вниз за течією річки визначимо опосередковано шляхом розрахунку зменшення діаметру частинок D при їх стиранні на шляху переміщення l (м) у обвідному каналі [5]:

$$D = D_0 \exp^{-ml}, \quad (20)$$

де D_0 і D – фоновий діаметр та діаметр частинок на виході з каналу, мм;

m – коефіцієнт, що враховує стійкість частинки до стирання, $5 \cdot 10^{-6} \leq m \leq 10 \cdot 10^{-6}$.

Розрахунки показали, що на виході з каналу діаметр дрібних, середніх і великих наносів становитиме 0,002, 0,19 і 0,99 мм, а середній діаметр частинок – 0,044 мм. Невелика довжина каналу ($l=232$ м) призводить до незначного зменшення діаметру наносів.

Визначимо середню швидкість водного потоку в районі мостових опор v_{cp} для побутового стану річки за залежністю (14). Максимальну гідравлічну крупність наносів U_{max} розраховуємо за залежністю (19) для частинок з діаметром $d=1,0$ мм. Таким чином, $U_{max} = 4,92$ м/см, швидкість $v_{cp} = 2,85$ м/с.

Розрахувавши діаметр частинок на виході з каналу D , визначимо середню швидкість потоку v_{cp} в районі мостового переходу з врахуванням зміни гідравлічної крупності наносів U та U_{max} . При виправленні русла швидкість потоку буде становити $v_{cp} = 2,82$ м/с.

Результати розрахунків коефіцієнта Шезі C для розрахункових створів досліджуваної ділянки водотоку зведені у табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта Шезі у створах річки*

Блок річки	Створ річки	Швидкість потоку v_{cp} , м/с		Глибина потоку H , м		Коефіцієнт Шезі C , м ^{1/2} /с	
		П	Б	П	Б	П	Б
1	Поч.	0,25	0,25	2,50	2,50	28	28
	Кін.	0,80	0,80	0,80	0,80	56	56
2	Поч.	0,80	0,80	0,80	0,80	56	56
	Кін.	0,80	0,76	0,80	0,94	56	13
3	Поч.	0,80	0,76	0,80	0,94	56	13
	Кін.	2,86	2,82	3,20	3,34	27	26
4	Поч.	2,86	2,82	3,20	3,34	27	26
	Кін.	0,25	0,21	2,50	2,64	28	20
5	Поч.	0,25	0,21	2,50	2,64	28	20
	Кін.	0,80	0,76	0,80	0,94	56	13
6	Поч.	0,80	0,76	0,80	0,94	56	13
	Кін.	2,86	2,82	3,20	3,34	27	26

*П – побутовий стік річки; Б – при зведенні берегоукріплювальних

Результати розрахунків мутності змиву $S_{\text{взм}}$ та донної мутності $S_{\text{н}}$ подані на рис. 3. При порівнянні даних показників до і після зведення споруд приходимо до висновків: у створі споруд показники мутності різко падають за рахунок освітлення потоку води; освітлення потоку води поширюється майже на відстань до 2 км вниз за течією річки.

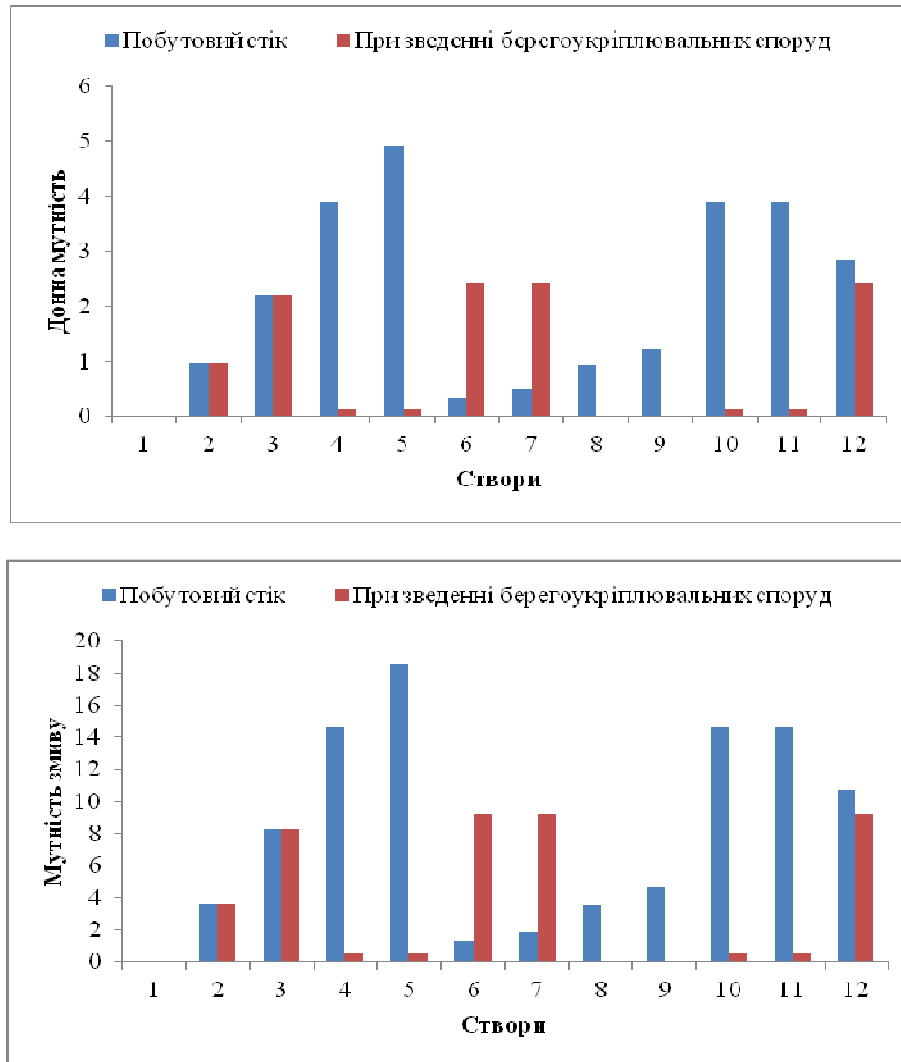


Рис. 3. Мутність змиву та донна мутність води до і після зведення споруд

За результатами прогнозування вертикального розподілу мутності на рис. 4 побудовані епюри мутності води у створах річки. Потік річки у кінцевому створі блоку 1, що розташований в районі перекаату, можна охарактеризувати як більш недовантажений наносами, ніж у початковому створі, що розташований в районі плес вверх за течією річки. В результаті зведення берегоукріплювальних споруд потік річки, що проходить у їх створі, стає більш перевантаженим наносами, ніж у побутовому стані річки. Подальші зміни водного потоку в районі споруд сприяють змінам його мутності у створах річки вниз за течією. Мутність води у цих створах змінюється також і в результаті появи випрямляючого каналу. Зокрема, у створі мостового переходу потік стає більш недовантаженим наносами порівняно із ситуацією до появи берегоукріплювальних споруд і випрямляючого каналу. Визначення зони нормалізації мутності водного потоку виконуємо за фактом відхилення епюри мутності для побутового стану річки від стоку річки з берегоукріплювальними спорудами. Дослідження показують, що така зона формується на відстані майже 2 км.

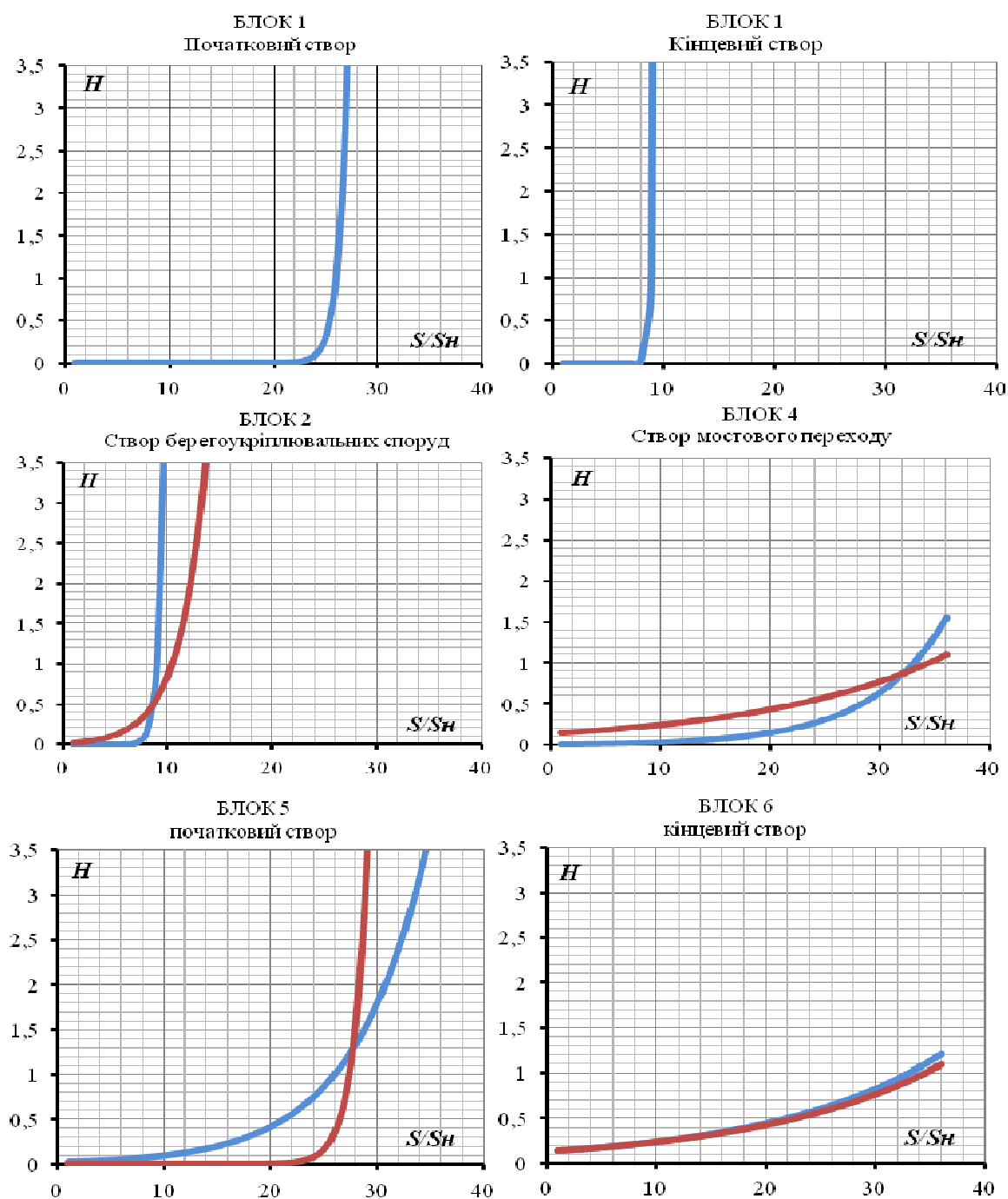


Рис. 4. Епюри розподілу мутності води у створах річки до і після зведення споруд

Результати розрахунків розподілу мутності води по довжині досліджуваної ділянки водотоку зведені у табл. 2. Таким чином, при умові зведення берегоукріплювальних споруд спостерігається різка зміна середньої мутності води за рахунок зменшення швидкості v_{cp} та збільшення глибини потоку H . Аналогічна ситуація спостерігається у створі мостового переходу. Вниз за течією річки в районі плес мутність сильно спадає за рахунок освітлення потоку, а в районі перекату блоку 6 вирівнюється до побутового стану річки.

Проведемо аналіз можливої реакції гідробіонтів на прогнозовані зміни мутності води в районі зведення берегоукріплювальних споруд.

Занурені макрофіти. Згідно результатів прогнозування мутності побутового стоку ділянки водотоку, що підлягає укріпленню, умови зростання макрофітів не є комфортними. Порогова мутність води для макрофітів складає $0,01-0,02 \text{ кг/м}^3$ [9], а

розрахована середня мутність побутового стоку річки – $1,06 \text{ кг/м}^3$. При зведенні берегоукріплювальних споруд середня мутність води буде складати $1,68 \text{ кг/м}^3$, що погіршує умови зростання макрофітів. Особливо несприятливим є 4 блок ділянки водотоку (рис. 2), мутність води якого зростає майже у 6 разів порівняно із побутовим стоком річки. Незначне освітлення потоку води в районі 5 блоку водотоку може сприяти збільшенню біомаси макрофітів.

Таблиця 2

Середня мутність води для розрахункових блоків річки

Блок річки	Створ річки	Ширина річки B , м	Параметр Γ		Коефіцієнт k		Транспортуюча здатність P_s , кг/с		Середня мутність P_{st} , кг/м^3	
			П	Б	П	Б	П	Б	П	Б
1	Поч.	30	0,72	0,72	3,52	3,52	0,27	0,27	0,27	0,27
	Кін.	38	0,33	0,33	1,48	1,48	0,71	0,71		
2	Поч.	38	0,33	0,33	1,48	1,48	1,07	1,07	1,07	1,07
	Кін.	40	0,03	0,41	1,03	1,71	0,99	1,33		
3	Поч.	40	0,03	0,41	1,03	1,71	1,11	1,33	1,11	1,33
	Кін.	39	0,67	0,86	3,00	7,19	0,90	5,96		
4	Поч.	39	0,67	0,86	3,00	7,19	1,08	5,96	1,08	5,96
	Кін.	34	0,67	0,29	3,06	1,42	1,65	0,11		
5	Поч.	34	0,67	0,29	3,06	1,42	1,88	0,11	1,88	0,11
	Кін.	40	0,03	0,41	1,03	1,71	0,99	1,35		
6	Поч.	40	0,03	0,41	1,03	1,71	0,99	1,35	0,99	1,35
	Кін.	28	0,20	0,20	1,25	1,25	1,08	1,04		

Фітопланктон. Пороговим значенням мутності води для фітопланктону в районі берегоукріплення вважаємо величину $0,81 \text{ кг/м}^3$ [6]. Мутність побутового стоку річки дещо перевищує зону комфорту для фітопланктону. При зведенні споруд у 5 блоці ділянки водотоку за рахунок освітлення потоку умови для зростання фітопланктону стають більш оптимальними, тому передбачається зростання біомаси водоростей.

Зоопланктон. Оптимальним діапазоном мутності води для зоопланктону приймаємо $0,8-1,6 \text{ кг/м}^3$, що встановлена для ракоподібних-фільтраторів [2]. Побутовий стік річки в районі будівництва споруд за показником мутності є сприятливим для розмноження і міграції ракоподібних. При зведенні споруд в районі 4 блоку ділянки водотоку різке зростання мутності води може призвести до значного скорочення біомаси зоопланктону.

Іхтіофауна. В районі зведення споруд особливий вплив на іхтіофауну має динаміка донної мутності води. Пороговим значенням донної мутності води вважаємо величину $0,25 \text{ кг/м}^3$ [4]. Середня розрахована донна мутність води побутового стоку річки складає $2,14 \text{ кг/м}^3$, що вище за порогове значення. При зведенні споруд донна мутність води зменшується до $0,92 \text{ кг/м}^3$, що сприяє концентрації іхтіофауни в районі зведення споруд.

За результатами розрахованої середньої мутності води на ділянці водотоку для побутового стоку річки можна зробити наступні висновки: 1) умови водного середовища за показником мутності для іхтіофауни не є комфортними, оскільки середнє значення мутності води вище за порогове значення $0,65 \text{ кг/м}^3$; 2) оптимальними блоками ділянки водотоку для концентрації іхтіофауни є блоки 1 та 6; 3) ділянка водотоку, що обмежена 2-5 блоками, за рахунок підвищеної фонові мутності води може сприяти появі безрибної зони.

За результатами розрахованої середньої мутності води на ділянці водотоку при зведенні споруд можна зробити наступні висновки: 1) умови водного середовища за показником мутності для іхтіофауни не є комфортними, оскільки середнє значення мутності води вище за порогове значення $0,65 \text{ кг/м}^3$; 2) оптимальним блоком ділянки

водотоку для іхтіофауни є блок 5, де потік освітлюється і мутність зменшується до $0,11 \text{ кг/м}^3$.

Висновки. Зміни мутності річкової води можуть викликати порушення встановлених складних енергетичних та речовинних зв'язків між різними компонентами та ярусами екосистеми, змінювати умови зростання та видовий склад водної рослинності, зменшувати кормову базу іхтіофауни, ускладнювати міграцію та орієнтацію гідробіонтів у потоці води, призводити до порушення їх активності або загибелі.

Основні причини зміни мутності води при берегоукріплювальних роботах пов'язані, в першу чергу, із стисненням водного потоку річки. Ефект стиснення призводить до епізодичного підняття рівнів води, змінюючи, таким чином, параметри водного потоку. Зміни мутності води можуть посилюватися в районі розташування мостових переходів вниз за течією від створу споруд. Крім ефекту стиснення водного потоку його виправлення може призводити до зменшення швидкості. Синергія стиснення і випрямлення потоку сприяє постійним змінам мутності води на певних ділянках річки. Будь-які відхилення режиму мутності потоку річки при зведенні споруд від побутового стану можуть свідчити про рівень впливу берегоукріплювальних робіт на руслові процеси.

Розглянутий вище приклад впливу берегоукріплювальних споруд на природну динаміку мутності водного потоку свідчить про те, що при визначенні рівня екологічної безпеки експлуатації таких об'єктів важливо аналізувати реакцію гідробіонтів на встановлену фонову мутність води. Так, для досліджуваної ділянки водотоку за показником мутності води умови зростання та розмноження макрофітів, фітопланктону та іхтіофауни можна охарактеризувати як некомфортні, при цьому вони є оптимальними для ракоподібних-фільтраторів. Для деяких видів гідробіонтів руслових біотопів річок, потік яких перевантажений наносами, зведення та експлуатація берегоукріплювальних споруд можуть виконувати меліоративну функцію: сприяти збільшенню їх біомаси, покращувати умови харчування та міграції за рахунок освітлення потоку води та зменшення донної мутності.

Література

1. Барышников Н.Б. Антропогенное воздействие на русловые процессы / Н.Б. Барышников / Учебное пособие. – Л.: Изд. ЛГМИ, 1990. – 140 с.
2. Горбунова А.В. Влияние повышенной мутности воды на планктонных ветвистоустых ракообразных-фильтраторов [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. биол. наук (03.00.18) / Горбунова Алевтина Владимировна; МГУ им. М.В. Ломоносова. – Москва, 1993. – 25 с.
3. Зюсько А.Я. Влияние повышенного содержания минеральных взвешенных веществ в воде на популяционные характеристики рыб горных рек [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. биол. наук (03.00.16) / Зюсько Анатолий Яковлевич; Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской Академии Наук. – Екатеринбург, 1993. – 19 с.
4. Калиничева В.Г. Влияние взвешенных веществ на рыб (икра, личинки, сеголетки) / В.Г. Калиничева // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ, 1987. Вып. 255. С. 55–58.
5. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов / А.В. Караушев // Монография. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 259 с.
6. Максимова А.Б. Оценка влияния повышенной мутности воды, возникающей при проведении гидротехнических работ, на структурно-функциональные характеристики фитопланктона [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. биол. наук (03.00.18) / Максимова Ольга Борисовна; ГосНИОРХ. – Санкт-Петербург, 2002. – 26 с.
7. Малі річки України: Довідник / А.В. Яцик, Л.Б. Бишовець та ін. За ред. А.В. Яцика. – К.: Урожай, 1991. – 296 с.

8. Морева А.О. Влияния работы земснаряда ЗРС-Г на жизнедеятельность гидробионтов при дноуглублении и добыче песка в озерном расширении р. Везломы у г. Бор Нижегородской обл. / А.О. Морева и др. // ВОДА: ХИМИЯ и ЭКОЛОГИЯ, 2014. № 4. С. 18–32.

9. Шерстнёва О.А. Влияние повышенной мутности воды, возникающей при проведении гидротехнических работ, на продуктивность погруженных макрофитов [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. биол. наук (03.00.18) / Шерстнева Ольга Александровна; ГосНИОРХ. – Санкт-Петербург, 2002. – 26 с.

10. Яцык А.В. Гидроэкология / А.В. Яцык, В.М. Шмаков. – К.: Урожай, 1992. – 192с.

11. Petticrew E.L., Albers S.J. 2010. Salmon as biogeomorphic agents: temporal and spatial effects on sediment quantity and quality in a northern British Columbia spawning channel // Sediment dynamics for a changing future. IAHS Publ, 337. P. 251–257.

Поступила в редакцію 28 жовтня 2015 р.

Рекомендувала до друку д.техн.н. Л.М. Архипова