

Тучковенко Ю.С., д.геогр.н., Гопченко Є.Д., д.геогр.н., Сербов М.Г., к.геогр.н., Медведєва Ю.С.

Одеський державний екологічний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ МІНЛИВОСТІ МІНЕРАЛІЗАЦІЇ ТА ЗАБРУДНЕННЯ ВОД ОЗ. КИТАЙ ПРИДУНАЙСЬКОЇ СИСТЕМИ

*Викладені результати та аналіз модельних розрахунків, які висвітлюють особливості циркуляції, просторово-часової мінливості мінералізації вод та розповсюдження на акваторії озера Китай забруднюючих речовин. Запропоновані науково-обґрунтовані рекомендації щодоможливого поліпшення якості вод водойми.*

**Вступ.** Озеро Китай входить до системи Придунайських озер. Через недостатній водообмін з р. Дунай і водоновлення озеро знаходиться у незадовільному екологічному стані і не відповідає вимогам щодо якості питної та зрошувальної води, зокрема, по показникам мінералізації. Для визначення шляхів вирішення цієї проблеми необхідно визначити особливості циркуляції вод і масообміну між різними частинами водойми, розповсюдження на її акваторії забруднюючих речовин, що надходять зі стоком невеликих річок та з водами р. Дунай, а також з'ясувати вплив на них існуючих гідротехнічних споруд. Робота є продовженням наукових досліджень, започаткованих в [1-3].

**Матеріали і методи дослідження.** В роботі використані матеріали Одеського обласного виробничого управління водного господарства щодо правил експлуатації водойми [4] та матеріали розрахунків складових водного і сольового балансу, отримані при виконанні роботи [3].

Для вирішення поставленої задачі використовувалася тривимірна числова гідродинамічна модель [5], адаптована до умов озера. Модель дозволяє виконувати розрахунки вітрових і градієнтних течій, коливань рівнів води у водоймі, розповсюдження домішок з різними властивостями на часових масштабах в декілька місяців в морфологічно складних водних об'єктах, окремі складові яких мають масштаб в одному з горизонтальних напрямків менший, ніж крок просторової розрахункової сітки.

Розрахункова область водойми покривалася сіткою  $44 \times 117$  вузлів з горизонтальним просторовим кроком 200 м. Використовувалися 4 розрахункових рівні по глибині в  $\sigma$ -системі координат. В основу розрахункової сітки закладена батиметрична карта водойми, знята з карт ЦО масштабом 1:10000 (рис. 1). Згідно з проектною документацією [4], у центральній частині озера задавалася дамба зі сполучним прорізом (шлюз на східному березі) шириною 12 м. Крім того, враховувалася наявність каналу Старотроянський, що зв'язує північну і південну частини водойми, із середньою шириною 16 м і глибиною 1.5 м. Канал і проріз зі шлюзом залишалися відкритими протягом усього розрахункового періоду.

Оскільки математична структура моделі не дозволяє робити розрахунки у випадку ізолюваного каналу, що пролягає по акваторії водойми, то канал був винесений за межі водойми, як показано на рис. 1.

Розрахунки проводилися в період з 1 березня по 31 вересня для умов маловодного і середньоводного років. Мінливість температури повітря, швидкості і напрямку вітру задавалася за даними щомісячних 6 - годинних спостережень на ГМС Болград, виконаних у 2001 році.

Витрати малих річок Киргиж-Китай і Аліяга, приплив вод р. Дунай у весняні місяці, а також їх мінералізація задавалася на основі розрахунків і оцінок, виконаних раніше в [3] (табл. 1). Зміни рівня водойми за рахунок дизбалансу опади - випаровування за розрахунковий період, що задаються по оцінках [3], наведені в табл. 2.

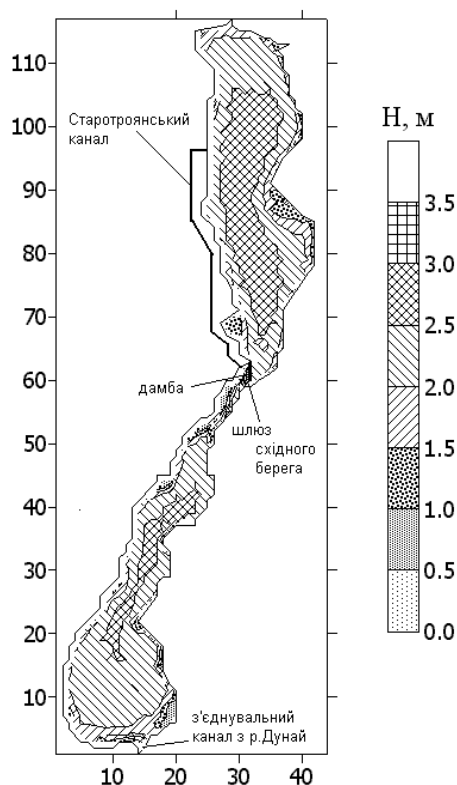


Рис. 1. Батиметрична карта оз. Китай (глибини зазначені при відмітці рівня води в озері 1.5 мБС). Осі розмічені в номерах вузлів розрахункової сітки з просторовим кроком  $\Delta x = \Delta y = 200$  м.

Таблиця 1. - Характеристики прихідної частини водно-солевого балансу оз.Китай, які використані в модельних розрахунках.

	Середньоводний рік					
	Витрати води, м <sup>3</sup> /с			Мінералізація, г/дм <sup>3</sup>		
Місяць	Канал з Дунаю	Киргиж-Китай	Аліяга	Канал з Дунаю	Киргиж-Китай	Аліяга
Березень	1.07	0.27	0.17	0.4	4.65	4.65
Квітень	7.60	0.24	0.15	0.4	4.76	4.76
Травень	2.96	0.13	0.08	0.4	5.07	5.07
Червень	0	0.09	0.06	0.4	5.21	5.21
Липень	0	0.17	0.11	0.4	4.95	4.95
Серпень	0	0.16	0.10	0.4	4.98	4.98
Вересень	0	0.19	0.12	0.4	4.90	4.90
	Маловодний рік					
	Витрати води, м <sup>3</sup> /с			Мінералізація, г/дм <sup>3</sup>		
Місяць	Канал з Дунаю	Киргиж-Китай	Аліяга	Канал з Дунаю	Киргиж-Китай	Аліяга
Березень	2.38	0.15	0.09	0.4	5.03	5.03
Квітень	5.69	0.13	0.08	0.4	5.08	5.08
Травень	1.32	0.07	0.05	0.4	5.25	5.25
Червень	0	0.05	0.03	0.4	5.33	5.33
Липень	0	0.09	0.06	0.4	5.19	5.19
Серпень	0	0.09	0.06	0.4	5.21	5.21
Вересень	0	0.11	0.07	0.4	5.16	5.16

Таблиця 2. - Оцінка мінливості рівня водойми за рахунок дизбалансу опади-випаровування

Місяць	Маловодний рік	Середньоводний рік
	мм	мм
Березень	4,3	8,6
Квітень	-51,4	-28,6
Травень	-115,9	-55,2
Червень	-130,2	-42,4
Липень	-144,0	-94,9
Серпень	-133,4	-152,0
Вересень	37,7	-58,7

**Результати моделювання циркуляції та просторово-часової мінливості мінералізації вод.** Циркуляція вод і водообмін між різними частинами озера Китай визначаються насамперед напрямком і силою вітру разом з впливом морфологічних особливостей водойми. Під дією вітру виникають дрейфові течії в поверхневому шарі водойми, які ініціюють нахили водної поверхні і, як наслідок, виникнення компенсаційних градієнтних течій. Відхилення водної поверхні формуються також припливом вод з каналу, що зв'єднує водойму з р. Дунай, і стоком невеликих річок Аліяга і Киргиз-Китай. Внаслідок цього формуються стокові течії.

Результуюча циркуляція вод являє собою суму векторів течій, обумовлених зазначеними вище факторами. Очевидно, що за наявності вітрів буде переважати перший механізм формування циркуляції вод (вітровий), а за їхньої відсутності – другий (стоковий).

Для з'ясування особливостей вітрової циркуляції вод в оз.Китай і визначення інтенсивності водообміну між різними частинами озера через сполучний проріз зі шлюзом у дамбі та Старотроянський канал, була проведена серія числових експериментів з гідродинамічною моделлю. Моделювалася стала циркуляція вод і відхилення рівня води у водоймі за вітрів силою 7 м/с різних напрямків. Розрахунок здійснювався на 10 діб модельного часу з урахуванням стоку річок і витрат води по сполучному з р.Дунай каналі, що відповідають березню (див. табл. 1-2).

Результати розрахунків показали (рис. 2), що при подовжніх щодо осі водойми вітрах переки рівня між її північним і південним кінцями не перевищує 9 см. Варто звернути увагу на те, що перепад рівня води на кінцях каналу Старотроянський, що визначає інтенсивність перетоку води по каналу, не перевищує 3 см. При північному і південному вітрах на мілководді уздовж західного і східного берегів у північній частині водойми, а також уздовж західного берега в південній частині озера формуються інтенсивні потоки, спрямовані за вітром, у той час як уздовж осі водойми на глибокій воді мають місце компенсаційні потоки, спрямовані проти вітру. Швидкості вздовжберегових течій досягають 6 – 11 см/с, у той час як швидкості компенсаційних течій уздовж осі водойми складають тільки 2 - 3 см/с (рис. 2а).

При вітрах, спрямованих під гострим кутом до осі водойми, вищеописана картина зберігається в цілому, однак істотно слабшають вздовжберегові потоки в північній частині водойми і практично руйнується потік уздовж західного берега - в південній частині озера. Характер інтегральної по глибині циркуляції вод у південній половині водойми набуває рис вихрової коміркової структури. При вітрах з подовжньою щодо осі водойми складовою, викликаний ними переки рівня між кінцями каналу ініціює спрямовані протилежно вітру градієнтні течії, що послабляє інтенсивність водообміну через канал.

При поперечних щодо осі водойми західному і східному вітрах на акваторії озера в полі середніх по глибині течій чітко виділяються окремі вихрові утворення, розташування яких відповідає відносно широким його частинам. Швидкості течій помітно слабшають. Дамба в центральній частині озера є нездоланною перешкодою для проникнення інтенсивного вздовжберегового потоку з однієї половини озера в іншу (рис. 2б). Фактично

водообмін через проріз у дамбі здійснюється між периферійними частинами різних вихрових утворень і тому дуже слабкий і близький за характером до турбулентного обміну імпульсом.

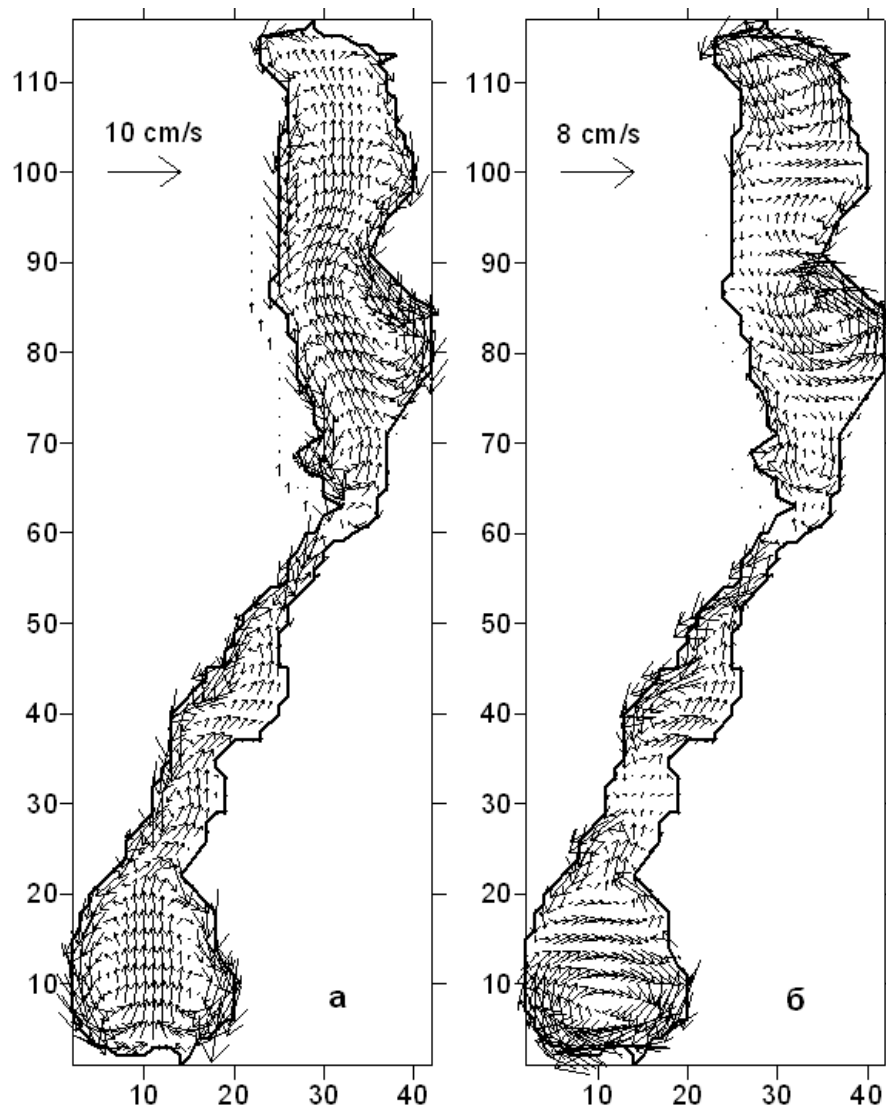


Рис. 2 Поле векторів середніх по глибині (баротропних) течій при північному (а) та східному (б) вітрах силою 7 м/с.

Для визначення впливу існуючих гідротехнічних споруд на інтенсивність водообміну між північною і південною частинами озера та просторово-часову мінливість мінералізації вод була проведена серія числових експериментів з моделлю за умов:

- 1) відсутності дамби, каналу і вільному водообміні між частинами озера;
- 2) наявності дамби зі шлюзом шириною 12 м і глибиною 1.7 м (відкритим на протязі розрахункового періоду) і відсутності каналу;
- 3) наявності дамби і каналу з відкритими шлюзами (рис. 3);
- 4) вилучення стоку невеликих річок Киргиж-Китай і Аліяга, за наявності дамби і каналу з відкритими шлюзами.

Моделювалися умови середньоводного і маловодного років. Отримані для різних сценаріїв поля мінералізації вод у відповідні моменти часу порівнювались між собою з використанням формули:

$$\alpha_{ij} = \left( \left( \frac{C_{2(ij)}}{C_{1(ij)}} \right) - 1 \right) * 100.,$$

де  $\alpha_{ij}$  - розбіжність значень мінералізації в %,  $C_{1(ij)}, C_{2(ij)}$  - значення мінералізації води в точці поля (i, j), розраховані на той самий момент часу при реалізації сценаріїв 1 і 2, відповідно. Негативні значення відповідають зниженню мінералізації у варіанті 2 у порівнянні з варіантом 1.

Розрахунки показали, що наявність дамби з прорізом шириною 12 м призводить до підвищення мінералізації вод у північній частині озера і зниженню її – в південній на 3 - 6 % (рис. 4а). Будівництво Старотроянського каналу не призвело до істотних змін мінералізації вод північної і південної частин озера (рис. 4б), тому що сформовані вітром перекоси рівня води у водоймі на кінцях каналу, а отже і витрати води через канал, невеликі. Наявність каналу змінює мінералізацію вод озера лише в межах декількох відсотків, зменшуючи її в південній половині водойми і збільшуючи – в північній. Отже, будівництво каналу і дамби призвели до зменшення солеобміну між північною і південною частинами водойми і, таким чином, сприяли збільшенню мінералізації вод у північній частині і зменшенню її в південній (до 8 %). В умовах середньоводного року мінералізація вод південної частини у серпні досягає 1.25 - 1.5 г/дм<sup>3</sup>, а північної – 2.75 - 3.25 г/дм<sup>3</sup>. В умовах маловодного року мінералізація вод північної частини в серпні зростає до 3.0 - 3.5 г/дм<sup>3</sup>, а південної – до 1.5 - 2 г/дм<sup>3</sup> за рахунок зменшення припливу дунайських вод навесні.

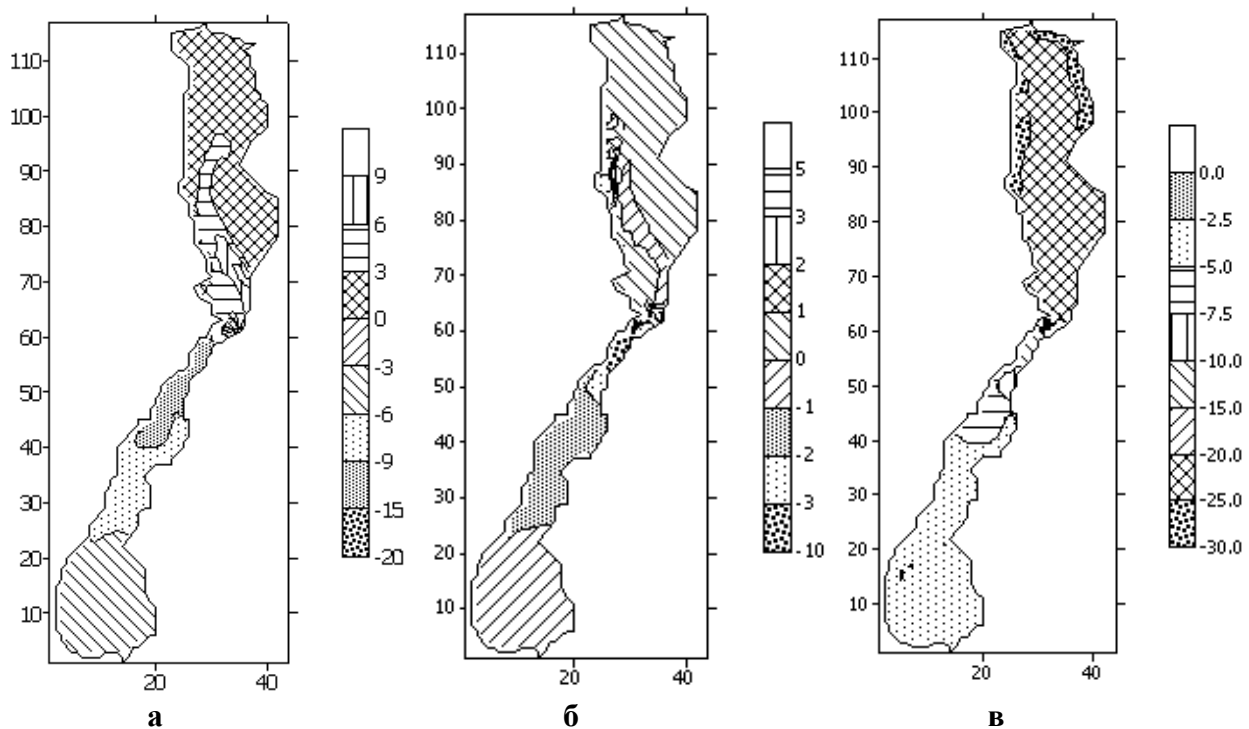


Рис. 4 Розходження між значеннями мінералізації вод оз.Китай (у %), розрахованими за моделлю для середини серпня середньоводного року при реалізації варіантів: а) наявності дамби зі шлюзом та відсутності її і каналу; б) наявності каналу та його відсутності при наявності дамби зі шлюзом; в) вилученні стоку невеликих річок за наявності каналу і дамби зі шлюзом.

Вилучення досить мінералізованого стоку невеликих річок Киргиж-Китай і Аліяга за умов середньоводного року, за наявності дамби і каналу зі шлюзами відкритими весь розрахунковий період, призведе до зниження мінералізації вод у північній частині водойми на 15 – 25 % у липні і 20 - 30 % – у серпні (рис. 4.в). У південній частині водойми

мінералізація знизиться на 1.5 - 5 % у липні і 2.5 - 7 % – у серпні. Співвідношення між мінералізацією вод північної та південної частин водойми складе 1.67.

В маловодний рік, при вилученні стоку невеликих річок, зниження мінералізації вод північної частини водойми складе 15 - 20 % у липні і 20 - 25 % – у серпні. У південній частині водойми мінералізація понизиться на 2 - 5 %. Співвідношення між мінералізацією вод в північній та південній частинах водойми зменшується з 1.82 (для сучасних умов) до 1.48.

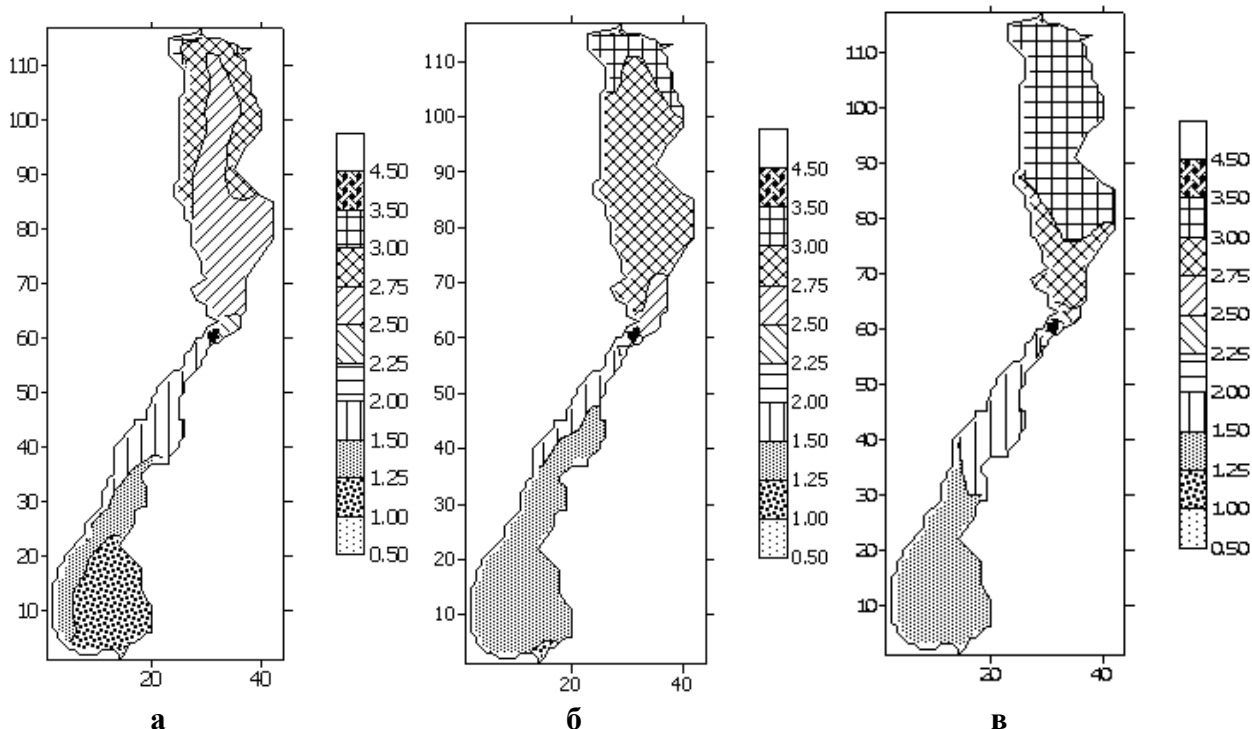


Рис. 3. Просторовий розподіл мінералізації вод оз.Китай, г/дм<sup>3</sup>, розрахований по моделі для середини травня (а), липня (б) і вересня (в) для середньоводного року за гідрометеорологічних умов 2001 р.

**Моделювання поширення забруднюючих речовин.** Для вивчення закономірностей поширення на акваторії озера забруднюючих речовин (ЗР) різних типів, що надходять зі стоком невеликих річок Киргиз-Китай і Алияга, а також з дунайськими водами, було проведено декілька числових експериментів з гідродинамічною моделлю, доповненою блоком переносу домішок. При розрахунках розглядалися умовні типи і концентрації ЗР з різним набором властивостей, а саме:

- 1) неконсервативні розчинені ЗР з питомою швидкістю хіміко-біологічної трансформації  $0.03 \text{ д}^{-1}$ , що відповідає швидкості деструкції нафти, СПАР при температурі води  $\approx 15 \text{ }^\circ\text{C}$  [6];
- 2) неконсервативні розчинені ЗР з питомою швидкістю хіміко-біологічної трансформації  $0.6 \text{ д}^{-1}$ , що відповідає швидкості загибелі патогенних бактерій при температурі  $\approx 15 \text{ }^\circ\text{C}$  [7].

Концентрації зазначених типів забруднюючих речовин у водах джерела забруднення (річкових) поклалися на рівні 100 умовних одиниць (%). Досліджувалися рівень і масштаб забруднення озера при надходженні ЗР з річковими водами у весняні місяці (березень - травень), коли їхні витрати максимальні. Використання умовних концентрацій дозволяє уніфікувати результати розрахунків, оскільки фактично розраховується поле концентрацій ЗР у відсотках від концентрації в джерелі. Фонова (початкова) концентрація ЗР, а також

вміст ЗР у річкових водах, що не розглядаються як джерела забруднення, приймалися рівними 0.

Моделювалося поширення неконсервативної домішки, що надходить в озеро з водами р. Дунай та зі стоком невеликих річок (рис. 5-7).

З розрахунків випливає, що внаслідок утрудненого водо- і масообміну між північною і південною частинами водойми забруднюючі речовини, що надходять з дунайськими водами, будуть акумулюватися у водах південної частини озера, а зі стоком невеликих річок – у північній.

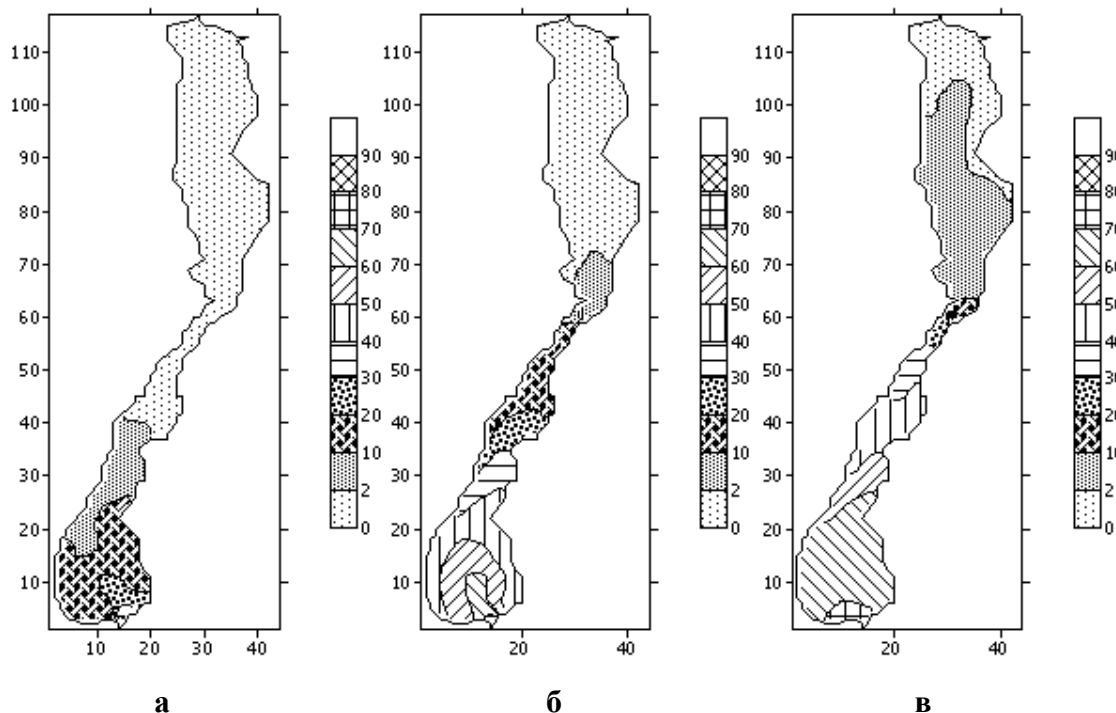


Рис. 5. Рівень забруднення вод озера розчиненими домішками з питомою швидкістю фізичної, хімічної та біологічної трансформації  $0.03 \text{ д}^{-1}$ , які надходять з водами р. Дунай в березні – травні: а – на 15 березня, б – на 15 квітня, в – на 15 травня.

Надходження ЗР зі стоком невеликих річок Киргиз-Китай і Аліяга призводить до підвищення концентрацій неконсервативної домішки із середньою стійкістю до хіміко-біологічної деструкції в водах північної частини озера у травні до 20 - 50 % від концентрації в річкових водах. За рахунок високої швидкості хіміко-біологічної деструкції, концентрації «біохімічно м'яких» ЗР в північній частині озера у травні не перевищують 20 %. Забруднення вод південної частини водойми ЗР, що надходять зі стоком невеликих річок, для всіх типів ЗР не перевищить 2 %.

Концентрації неконсервативних забруднюючих речовин з питомою швидкістю хіміко-біологічної трансформації  $0.03 \text{ д}^{-1}$ , що надходять з дунайськими водами в південну частину озера, складають у травні 2 – 10 % (від концентрації в дунайській воді) в північній частині озера і 30-70 % - у південній. Для «біохімічно м'яких» ЗР (тобто тих, що характеризуються відносно високими швидкостями деструкції) концентрації в травні складуть у південній частині 2-20 % від величин, що спостерігаються в дунайських водах, а в північній - не перевищують 2 %.

**Висновки.** Моделювання течій в оз.Китай показало, що будівництво дамби утруднило водообмін між північною і південною частинами озера, оскільки порушився інтенсивний вздовжбереговий потік на мілководді при подовжніх вітрах.

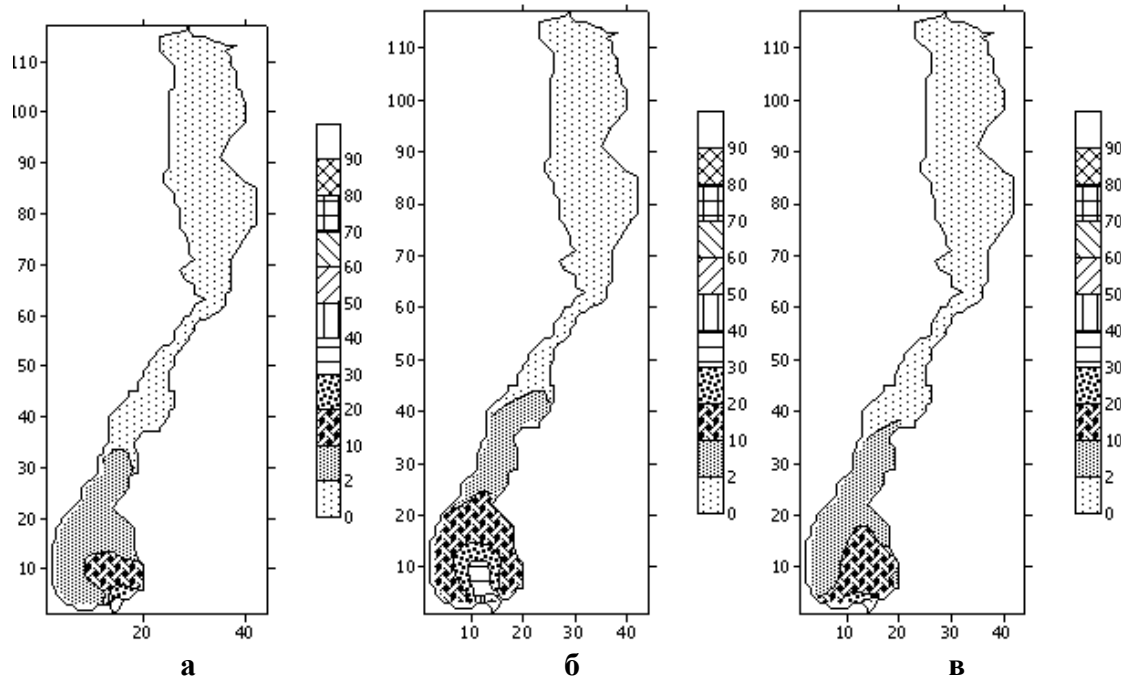


Рис. 6. Рівень забруднення вод озера розчиненими домішками з питомою швидкістю фізичної, хімічної та біологічної трансформації  $0.6 \text{ д}^{-1}$ , які надходять з водами р. Дунай в березні – травні: а – 15 березня, б – 15 квітня, в – 15 травня.

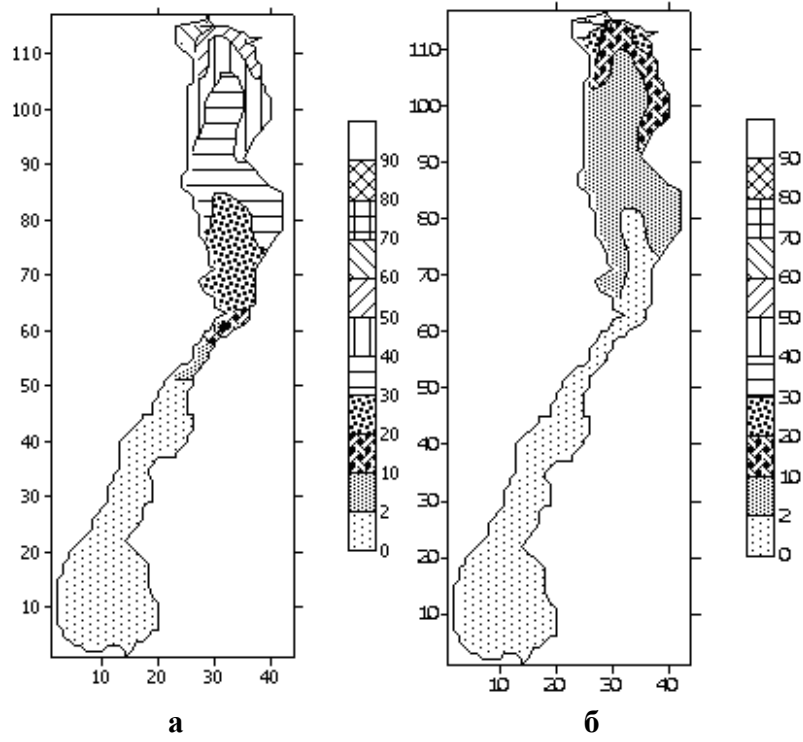


Рис. 7. Рівень забруднення вод озера розчиненими домішками з питомою швидкістю фізичної, хімічної та біологічної трансформації  $0,03 \text{ д}^{-1}$  (а) і  $0.6 \text{ д}^{-1}$  (б), які надходять з водами невеликих річок, станом на 15 травня.



Будівництво каналу і дамби призвели до зменшення солеобміну між північною і південною частинами водойми і, таким чином, сприяли збільшенню мінералізації вод у північній частині і зменшенню її - у південній (до 8 %). При збереженні сучасних умов формування водо- та сольообміну між північною та південною частинами озера найбільш раціональним представляється використовувати воду в іригаційних цілях з південної, тобто менш мінералізованої частини озера. Як один із варіантів підвищення ефективності Старотроянського каналу, можна запропонувати використовувати його для водозабору в іригаційних цілях з південної частини озера після попереднього подовження до півдня і розміщення шлюзу на північному кінці каналу.

Найбільш радикальним вирішенням проблеми зменшення мінералізації вод озера представляється вилучення стоку до нього невеликих річок Киргиз-Китай і Аліяга, що дозволить зменшити мінералізацію вод північної частини на 20-30 % в умовах серпня середньоводного року (до 2.0 - 2.3 г/дм<sup>3</sup>) і 20 - 25 % – для маловодного року (до 2.25 - 2.5 г/дм<sup>3</sup>). У південній частині озера мінералізація вод також знизиться в порівнянні із сучасною ситуацією на 2.5 - 7 % в умовах середньоводного року і 2 - 5 % – в умовах маловодного року. Співвідношення між мінералізацією вод в північній та південній частинах водойми зменшиться з 2.1 до 1.6. Практична реалізація цього варіанту можлива шляхом подовження Старотроянського каналу від гирл невеликих річок до р. Дунай. При цьому витрати води у каналі будуть визначатися різницею позначок рівнів води в озері і р. Дунай, яка у літні місяці значно перевищує денівеляції рівня моря, ініційовані вітром і надходженням річкових вод, тобто ефективність каналу збільшиться.

Результати моделювання поширення забруднюючих речовин різних типів, що надходять у водойму з річковими водами, свідчать, що через утруднений розділовою дамбою водообмін між північною та південною частинами озера, буде мати місце істотне накопичування забруднюючих речовин у тій частині водойми, куди вони надходять. Очікуваний рівень забруднення СПАР та нафтопродуктами вод південної частини водойми може перевищувати 50 % від їх середньої концентрації в дунайській воді в період наповнення озера. Рівень забруднення патогенною мікрофлорою не буде перевищувати 20 % від її вмісту в дунайській воді.

Рівень забруднення вод північної частини водойми СПАР та нафтопродуктами, що надходять з річковим стоком Киргиз-Китай і Аліяга, буде знаходитись в межах 20 - 50 % від їх середньої концентрації в річкових водах, а патогенною мікрофлорою – до 20 %.

Проникнення ЗР через проріз дамби з південної частини озера в північну формує рівень забруднення вод північної частини для СПАР і нафтопродуктів – не більш 10 %, а для патогенної мікрофлори – не більш 2 %.

Рівень забруднення вод південної частини озера речовинами, що надходять зі стоком невеликих річок, не перевищить 2 % від їхнього вмісту в річкових водах Киргиз-Китай і Аліяги.

Приведені результати розрахунків рівня та масштабів забруднення вод озера різними типами забруднюючих речовин, що містяться в річковому стоці, можуть бути використані при екологічному менеджменті водойми для прогнозування забруднення її вод на підставі інформації про концентрацію забруднюючих речовин у річкових водах.

### ***Список літератури***

1. *Дослідити особливості просторово-часової мінливості мінералізації та розповсюдження забруднюючих речовин в озері Китай: Звіт про НДР/ Одес.Держ.Екол.Ун-т; № ДР 0106U009077.– Одеса, 2006.– 58 с.*
2. *Гопченко Є.Д., Медведєва Ю.С. Особливості водного і сольового режимів оз.Китай у 2005 та 2006 рр.// Вісник Одеського державного екологічного університету.– 2007.- Вип.4., – С.280-286.*

3. *Науково-технічне обґрунтування подальшого використання озера Китай: Звіт про НДР/ Одес.Держ.Екол.Ун-т; № ДР 0105U008000.*– Одеса, 2005.– 157 с.
4. *Озеро Китай. Правила експлуатації водохранилища / Гос. регин. проект.- изыскат. институт “Укрюжгипроводхоз”.*- Одеса, 2000.- 75 с.
5. *Тучковенко Ю.С.* Гидродинамическая модель для расчета трехмерной циркуляции и термохалинной структуры вод северо-западной части Черного моря // *Метеорологія, кліматологія та гідрологія.*– 2002.– № 45. – С. 129 - 139.
6. *Родзиллер И.Д.* Прогноз качества воды водоемов-приемников сточных вод. – М.: Стройиздат. – 1984. – С. 183 – 186.
7. *Mancini J.J.* Numerical Estimation of Coliform Mortality Rates under Various Conditions // *Journal of Water Pollution Control Federation.*– 1978.– Vol.50 – P. 2477.

**Ю.С. Тучковенко, Е.Д. Гопченко, Н.Г. Сербов, Ю.С. Медведева**

**Моделирование пространственно-временной изменчивости минерализации и загрязнения вод оз. Китай Придунайской системы**

Изложены результаты и анализ модельных расчетов, которые проясняют особенности циркуляции, пространственно-временной изменчивости минерализации вод и распространения на акватории озера Китай загрязняющих веществ. Разработаны научно-обоснованные рекомендации для возможного улучшения качества вод водоема.

**Y.S. Tuchkovenko, E.D., Gopchenko, M.G. Serbov, Y.S. Medvedeva**

**Design of spatial-temporal changeability of mineralization and contamination of waters in China like of the near - Danube system**

Results and analysis of model calculations, which make clear the features of circulation, spatial-temporal changeability of mineralization of waters and distribution on the aquatorium of the lake China of contaminating matters, are expounded. The scientific-grounded recommendations for the improvement of water quality in reservoir are developed.