

УДК 551.16:504.42

Ю.С. Тучковенко, д.геогр.н., О.А. Тучковенко  
Одеський державний екологічний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ СТОКУ Р.ДУНАЙ НА ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ МОРСЬКИХ ВОД В АКВАТОРІЇ О.ЗМІЇНИЙ

Наведені результати числових експериментів з моделювання розповсюдження трансформованих вод р.Дунай, різних типів забруднювальних речовин, які надходять з річковим стоком Дунаю, на акваторії північно-західної частини Чорного моря, включаючи ділянку гирло річки Дунай – о. Зміїний, за гідрометеорологічних умов 2006 (багатоводний) і 2007 (маловодний) років.

**Вступ.** У зв'язку з розвитком інфраструктури та провадженням господарської діяльності на о. Зміїний і континентальному шельфі північно-західної частини Чорного моря (ПнЗЧМ), планами щодо створення в акваторії острова природоохоронної зони, особливої актуальності набуває оцінка впливу стоку р.Дунай на якість морських вод на ділянці гирло р.Дунай – о.Зміїний та зокрема в акваторії самого острова.

Характер і особливості мінливості гідрологічних і гідрохімічних параметрів морських вод в акваторії о.Зміїний значною мірою визначаються віддаленістю проникнення від гирла у відкриту частину акваторії ПнЗЧМ і ступенем трансформації вод р. Дунай.

Вочевидь, що як трасер трансформованих дунайських вод на ділянці гирло річки Дунай – острів Зміїний можна розглядати солоність морських вод. Зниженню солоності морської води в акваторії острова відповідає збільшення негативного впливу стоку р. Дунай на якість вод досліджуваної акваторії, а збільшення солоності свідчить про проникнення чистих вод з відкритої частини Чорного моря. Отже, досліджуючи мінливість просторового розподілу солоності вод в поверхневому шарі на ділянці акваторії ПнЗЧМ, що примикає до гирлової області р. Дунай, можна, в першому наближенні, сформулювати уяву щодо характеру впливу стоку р. Дунай і вітрових умов на екологічний стан вод в акваторії о.Зміїний.

Згідно [1], за межу розповсюдження трансформованих річкових вод можна прийняти положення ізохалини 17 ‰. В [2] запропоновано наступне районування акваторії моря, води поверхневого шару якої розпріснені річковим стоком:

- зона первинної трансформації річкових вод, що включає фронт первинної трансформації (гідрофронт), 3 – 10 ‰;
- зона вторинної трансформації між ізохалинами 10 ‰ і 14 ‰ (фронт вторинної трансформації);

- зона повної трансформації, зовнішньою межею якої служить фронт повної трансформації (ізохалина 17 ‰).

Води, які мають на поверхні солоність 17 ‰, вважаються морськими поверхневими водами шельфу ПнЗЧМ.

Те, в якій зоні знаходитиметься акваторія о.Зміїний у поточний момент часу, залежить, по-перше, від витрат річки Дунай і, по-друге, від вітрових умов (сили, напряму і тривалості дії вітру). Аналіз впливу вказаних чинників на гідрологічні і гідрохімічні характеристики морських вод на ділянці гирло р. Дунай – о.Зміїний за допомогою числової математичної моделі формування якості вод шельфових морських екосистем [3] є метою даної роботи.

Солоність морської води є консервативною гідролого-гідрохімічною характеристикою. Проте багато типів хімічних і біологічних забруднювальних речовин неконсервативні, оскільки, потрапляючи в водне середовище, ці речовини залучаються до різного роду фізичних, хімічних, біологічних і змішаних процесів, у результаті чого трансформуються в пасивні (стосовно біотичних складових екосистеми) хімічні елементи і сполуки або виводяться з водного середовища.

Рівень забруднення вод акваторії о.Зміїний неконсервативними забруднювальними речовинами, що надходять до моря зі стоком Дунаю, окрім гідрометеорологічних чинників, залежатиме від швидкості їхньої деструкції (трансформації) в морському середовищі, яка визначається хімічною природою забруднення, гідрологічними і гідрохімічними умовами.

**Методика дослідження.** Дослідження впливу стоку р.Дунай на формування якості вод в акваторії о.Зміїний виконувалося за допомогою числової тривимірної нестационарної гідротермодинамічної моделі [4], доповненої блоком самоочищення морських вод від забруднювальних речовин антропогенного походження [5], на прикладі двох найбільш поширених і небезпечних типів забруднюючих речовин (ЗР): нафтопродуктів і патогенних мікроорганізмів. Вірогідність забруднення дунайських вод нафтопродуктами значно зростає у зв'язку з функціонуванням нафтотерміналу портового комплексу Джурджулешти (Молдова) поблизу м. Рені та судноплавного каналу через рукав Бистрий. Патогенні мікроорганізми можуть надходити з неочищеними стічними водами тваринницьких ферм, каналізаційними скидами населених пунктів, які розташовані на берігах річки Дунай, змиватися з території водозбору річки при сильних зливах, паводках.

Розрахункова область північно-західної частини Чорного моря (рис. 1), до якої була адаптована модель, апроксимувалася горизонтальною сіткою  $36 \times 72$  вузлів з кроком 5 км. Крок за часом становив 6 секунд для баротропної складової швидкості течій і 12 секунд – для барокліної.

Використовувалися десять розрахункових рівнів за глибиною в  $\sigma$ -системі координат.

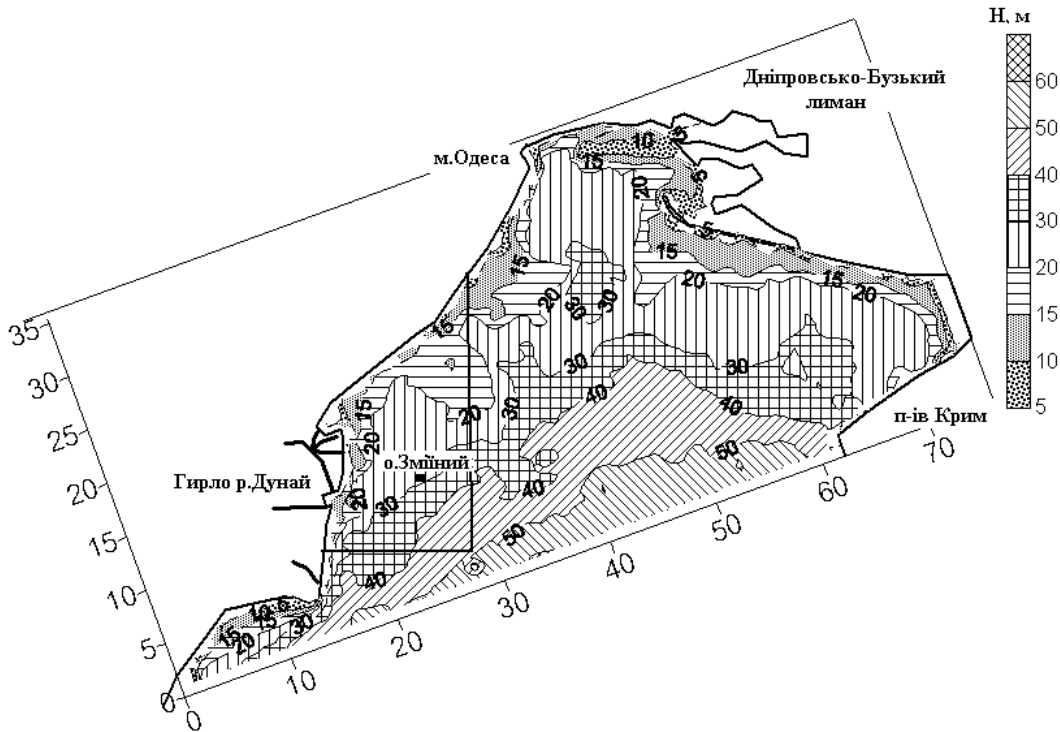


Рис. 1 – Розрахункова область і батиметрична карта (глибини в метрах) північно-західного шельфу Чорного моря. На осях наведені номери вузлів розрахункової сітки.

При розрахунках враховувалося самоочищення вод від вказаних типів ЗР в результаті процесів їх фізичної, хімічної і біологічної трансформації. Деструкція і деградація ЗР у водному середовищі описувалася кінетичним рівнянням реакції 1-го порядку

$$F_i = \frac{dC_i}{dt} \Big|_{local} = -K_{ci}C_i, \quad (1)$$

де  $F_i$  – функція неконсервативності  $i$ -ої домішки в рівнянні перенесення;  $K_{ci}$  – коефіцієнт неконсервативності (деструкції) ЗР, який є питомою швидкістю трансформації в результаті сукупної дії фізико-хімічних і хіміко-біологічних процесів самоочищення вод без деталізації їхніх внесків.

Коефіцієнт неконсервативності для нафтопродуктів  $K_{nf}$  задавався на основі наведених в роботі [6] даних лабораторних експериментів з

визначення залежності періоду напіврозпаду розчинених форм нафти  $\tau_{nf}$ , в годинах, від температури води  $T_w$ , в °C,

$$K_{nf} = \ln 2 / \tau_{nf}, \text{ де } \tau_{nf} = 1260.42 - 54.928T_w + 0.5688T_w^2. \quad (2)$$

Питома швидкість деструкції патогенних мікроорганізмів групи кишкової палички (колі-форми (*Coliforms*) - аналог колі-індексу), відповідно до [7], визначалася залежністю такого типу

$$K_{coli} = k_n \rho_S^{(S)} \rho_T^{(T_w - 20)}, \quad (3)$$

де  $k_n$  – швидкість загибелі колі-форм у темряві при температурі води  $T = 20$  °C і солоності  $S = 0.0/_{00}$  ( $k_n \approx 0.8 \text{ д}^{-1} \approx 0.033 \text{ рік}^{-1}$ );

$\rho_S^{(S)}$ ,  $\rho_T^{(T-20)}$  – поправкові коефіцієнти на термohалинні умови *in situ*, де  $\rho_S = 1.006$  і  $\rho_T = 1.07$ .

Зазначимо, що коефіцієнти неконсервативності вказаних типів ЗР відрізняються на порядок. Патогенні мікроорганізми відносяться до «біологічно м'яких» забруднювальних речовин, а розчинені нафтопродукти характеризуються відносною стійкістю до біохімічного розкладання.

Концентрація ЗР в річкових водах вважалася рівною 100 умовним одиницям (відсоткам). Використання умовних концентрацій дозволяє уніфікувати результати розрахунків, оскільки фактично розраховується поле концентрацій ЗР у відсотках від концентрації в джерелі. Типи забруднювальних речовин, що розглядаються, вважаються домішкою нейтральної плавучості.

**Опис вхідної інформації та початкових умов числових експериментів з моделлю.** Модельні розрахунки проводилися для умов багатоводного, відносно стоку р. Дунай (рис. 2), 2006 р. і маловодного 2007 р. в період з 1 березня по 31 вересня. Значення витрат води по рукавах дельти р. Дунай у 2006-2007 рр. одержані за даними [8, 9]. При розрахунках мінливості термohалинної структури вод ПнЗЧМ враховувався річний стік Дніпра, Південного Бугу і Дністра.

Мінливість швидкості і напрямку вітру задавалася на основі даних спостережень в п. Усть-Дунайськ, виконаних з 3-годинною дискретністю, а мінливість температури повітря – на основі середньодобових значень, одержаних за даними спостережень на о. Зміїний. Мінералізація дунайських вод вважалася постійною і рівною  $0.4 \text{ г/дм}^3$ .

Термohалинна структура вод на відкритій морській межі визначалася відповідно до інформації, наведеної в [10, 11] і ГІС Black Sea Environmental Programme (BSEP), яка корегувалася в межах поверхневого 10 – метрового

шару на основі даних спостережень за температурою и солоністю води в прибережній зоні о.Зміїний, одержаних у відповідні періоди часу.

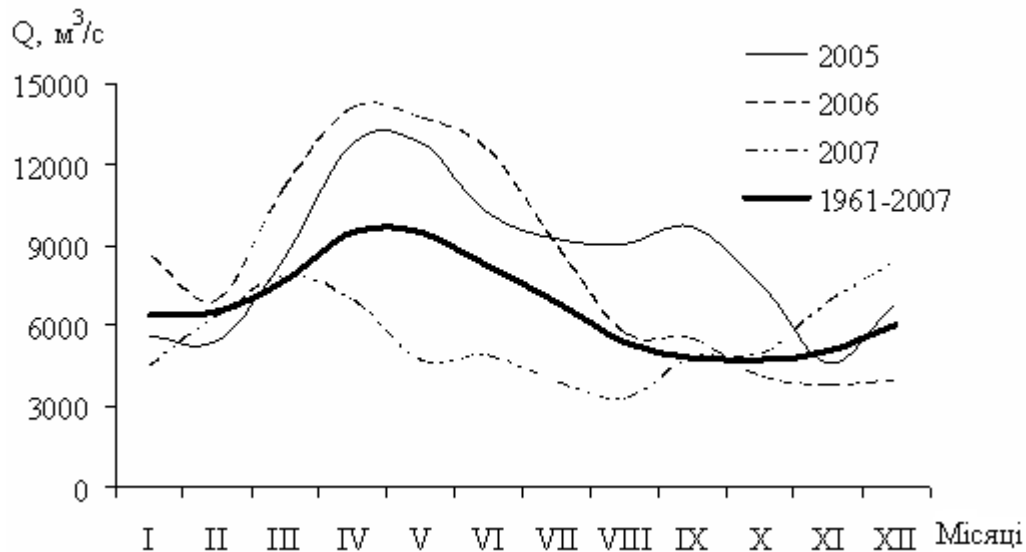


Рис. 2 – Внутрішньорічний розподіл витрат води у вершині гирлової області р. Дунай в 2005 – 2007 рр. і за багаторічний період.

Як початкові умови брався стан спокою. Термохалинна структура вод в початковий момент часу задавалася однорідною в горизонтальній площині. Фоновий рівень концентрації домішки (забруднювальних речовин) у внутрішніх точках розрахункової області і на відкритій морській межі вважався рівним нулю.

**Аналіз одержаних результатів розрахунків.** На рис. 3 - 4 наведені результати моделювання просторово-часової мінливості солоності води, концентрацій розчинених нафтопродуктів і патогенних мікроорганізмів, які надходять із стоком р. Дунай, в поверхневому шарі акваторії ПнЗЧМ в період з березня по вересень 2006 р. Звертають на себе увагу такі особливості.

У полі солоності поверхневого шару ПнЗЧМ добре простежується межа розповсюдження трансформованих річкових вод, а також вплив на її розташування вітрових умов і особливостей циркуляції вод. Як випливає з рис. 2, у 2006 році стік Дунаю максимальний у квітні (14100 м³/с), а потім зменшується аж до листопада (3810 м³/с). Якби на площу розповсюдження дунайських вод впливали тільки витрати річки Дунай, то вона повинна була б, досягнувши максимуму в квітні-травні, поступово скорочуватися аж до вересня.

Вказана тенденція дійсно простежується, проте на її фоні відзначаються моменти часу, протягом яких площа зони розповсюдження дунайських вод різко скорочується у весняний період, притискаючись до гирлової області р. Дунай (рис. 3.б), або, навпаки, збільшується (гідрофронт зміщується у бік моря) в літній період (рис. 3.в, е). Вочевидь, що виходячи з умов моделювання, до такого ефекту може призвести тільки дія вітру.

Аналогічно солоності змінюються і площі забруднення вод шельфу типами ЗР, що розглядаються. Суттєві відмінності у характері розповсюдження нафтопродуктів і патогенної мікрофлори на акваторії ПнЗЧМ починають виявлятися наприкінці серпня – у вересні (рис. 4), що, можливо, пов'язано з впливом конвективного перемішування на початку осіннього вихолодження вод поверхневого шару, а також з різним ступенем залежності швидкості деструкції даних типів забруднювальних речовин від температури води.

В умовах маловодного року акваторія о.Зміїний, як правило, знаходиться в зоні повної трансформації дунайських вод. Характерні значення концентрації забруднювальних речовин значно зменшуються (рис. 5, 6.в). Видно, що в травні-липні – для нафтопродуктів і до кінця розрахункового періоду – для патогенних мікроорганізмів, забруднення вод поверхневого шару акваторії острова носить епізодичний характер. Як і для умов 2006 р., відзначається збільшення площі забруднення шельфової зони ПнЗЧМ у вересні.

На рисунку 6.а наведена мінливість вітрових умов в період проведення модельного експерименту. Звертає на себе увагу, по-перше, факт переважання вітрів зі східною складовою (негативні значення проекції швидкості вітру на напрям захід-схід) у 2006 р., по-друге, в умовах багатоводного року простежується зв'язок підвищення солоності і зниження рівня забруднення вод акваторії о.Зміїний з посиленням або тривалою дією вітрів зі східною складовою (притискаючих до берега). Вітри із західною складовою (віджимні) менш сильні і тривалі, тому на площу розповсюдження дунайських вод впливають менше. Однак в умовах маловодного року їх роль збільшується. Епізодичні піки збільшення концентрації забруднювальних речовин в акваторії острова (рис. 6) пов'язані з посиленням вітрів із західною складовою (відгінних).

На рис. 6.б, в наведена розрахована за допомогою моделі часова мінливість солоності води, концентрацій ЗР в поверхневому шарі вод в точці розрахункової області (26,11), прилеглої до о.Зміїний (рис. 1). Видно, що солоність і концентрації ЗР змінюються синхронно, але в протифазі, тобто максимумам солоності відповідають мінімальні концентрації забруднювальних речовин і навпаки. З рисунка видно також, що час добігання дунайських вод до акваторії о.Зміїний становить 20 - 40 діб.

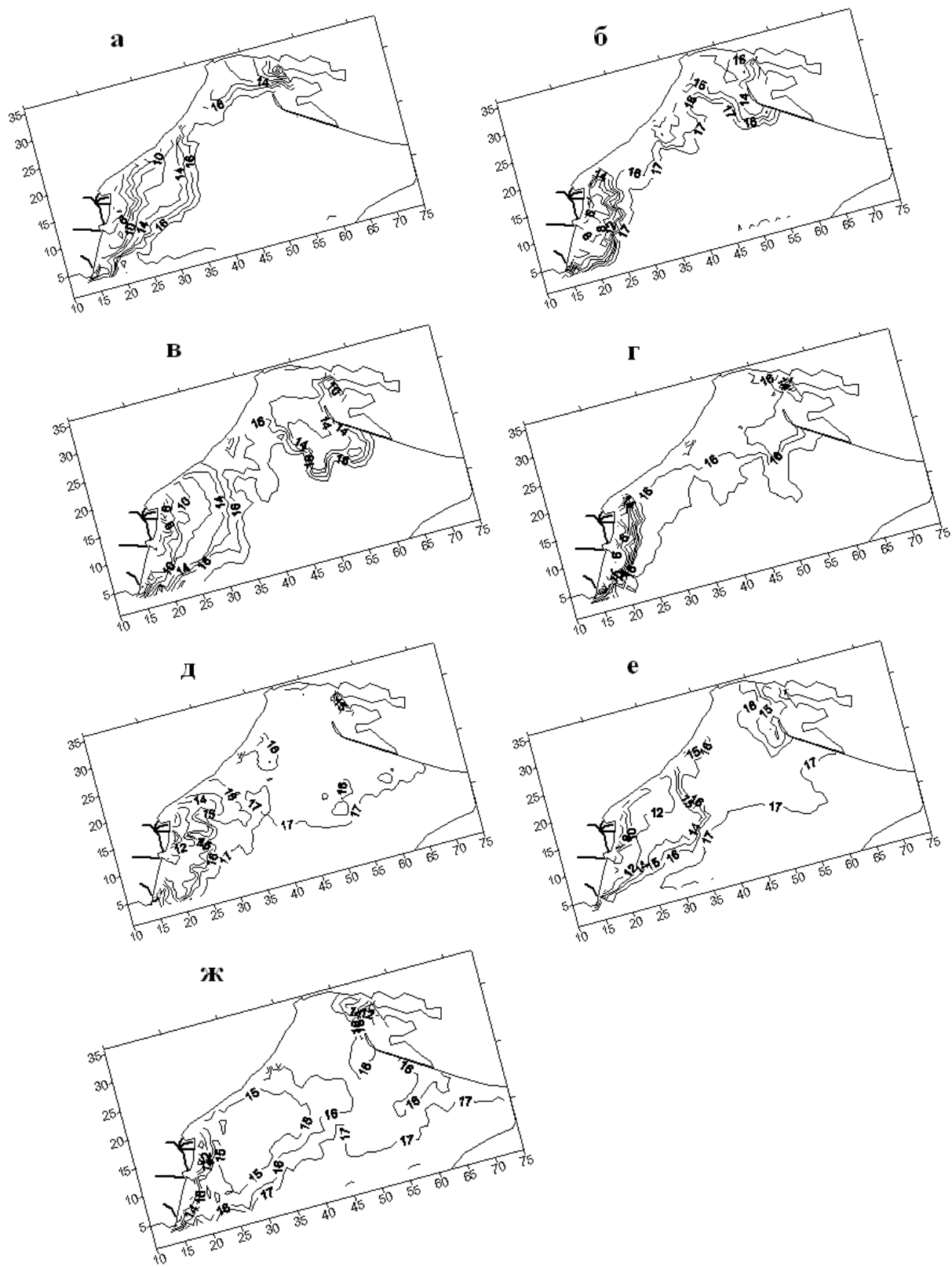


Рис. 3 – Просторово-часова мінливість солоності вод (‰) поверхневого шару північно-західної частини Чорного моря за результатами моделювання для умов багатоводного 2006 р.: а - 14.04; б – 09.05; в – 13.06; г – 08.07; д - 18.07; е - 27.08; ж – 16.09.2006 р.

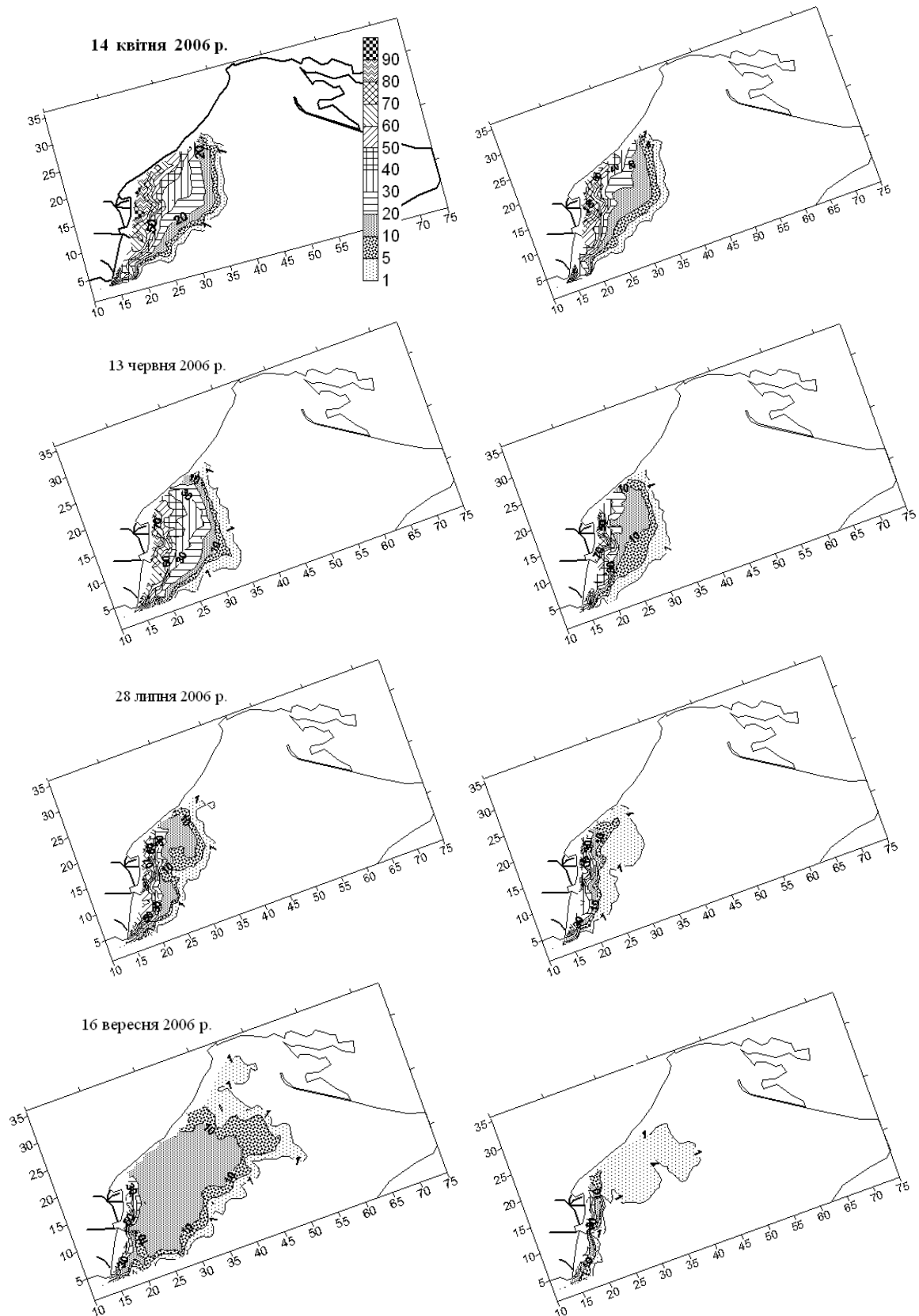


Рис. 4 – Просторово-часова мінливість нафтопродуктів (ліворуч) та концентрації патогенних мікроорганізмів (праворуч), у % від концентрації в дунайських водах, в водах поверхневого шару ПнЗЧМ за результатами моделювання для умов багатоводного 2006 р.



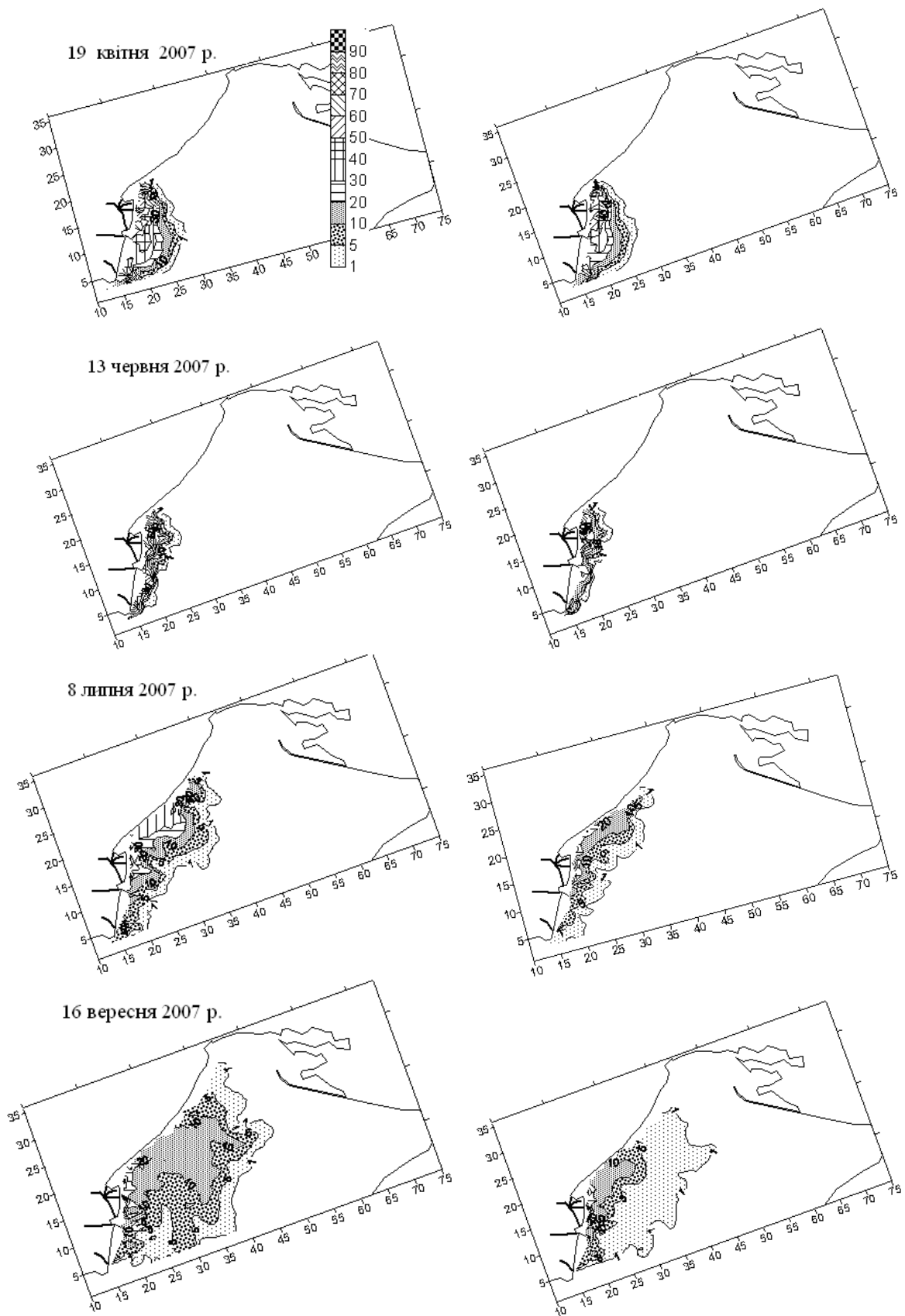


Рис. 5 – Просторово-часова мінливість нафтопродуктів (ліворуч) та концентрації патогенних мікроорганізмів (праворуч) в водах поверхневого шару ПнЗЧМ за результатами моделювання для умов маловодного 2007 р.

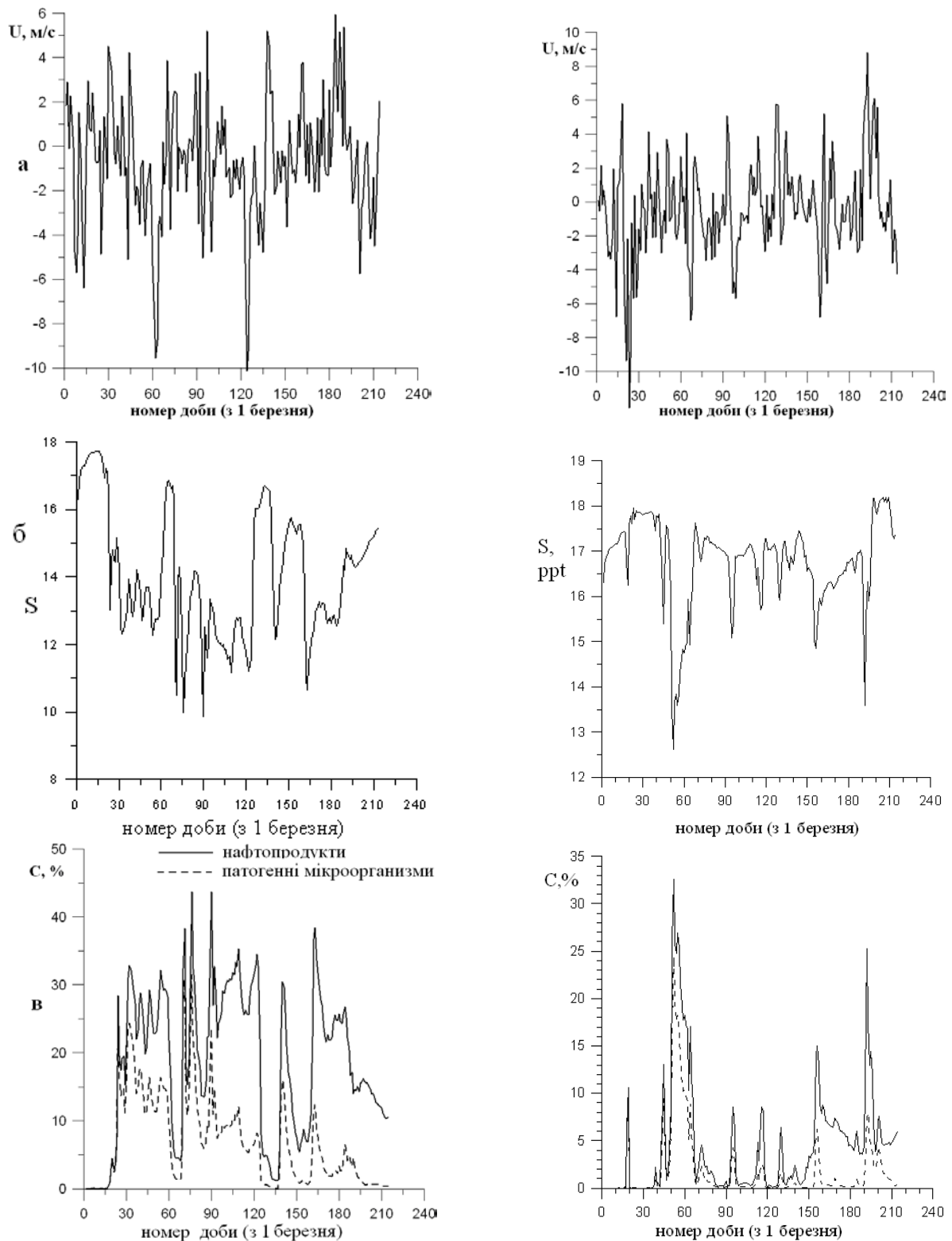


Рис. 6 – Мінливість проекції вектора швидкості вітру на напрям захід – схід протягом розрахункового періоду (а), розрахована за допомогою моделі мінливість у водах поверхневого шару акваторії о.Зміїний солоності (б), ‰, відносної концентрації нафтопродуктів і патогенних мікроорганізмів (в), у % від концентрації в дунайських водах, за гідрометеорологічних умов 2006 (ліворуч) і 2007 (праворуч) рр.

Характер взаємозв'язку між концентрацією досліджуваних забруднювальних речовин в акваторії о.Зміїний і солоністю вод, яка розглядається як трасер трансформованих дунайських вод, показано на рис. 7. Видно, що для нафтопродуктів, які на порядок більш консервативні ніж патогенні бактерії, цей зв'язок з солоністю практично прямолінійний. Для патогенних бактерій зв'язок концентрації з солоністю суттєво менш однозначний. Відзначається значний розкид значень концентрації при одній і тій же солоності. В умовах маловодного року зв'язок концентрації патогенних мікроорганізмів в водах акваторії острова з солоністю стає більш лінійним (зменшується розкид), що обумовлено зменшенням впливу мінливості солоності на швидкість деградації даного типу забруднювальної речовини.

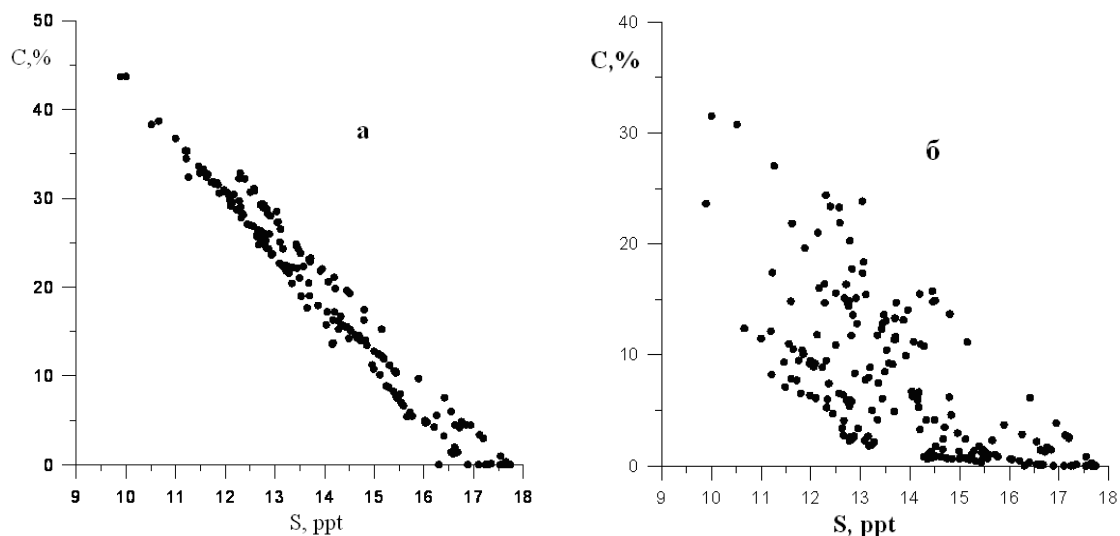


Рис. 7 – Залежність концентрації нафтопродуктів (а) і патогенних мікроорганізмів (б), у % від концентрації в дунайських водах, від солоності вод поверхневого шару в акваторії о.Зміїний за гідрометеорологічних умов 2006 р.

На рис. 8 показана мінливість вертикального розподілу гідрологічних і гідрохімічних характеристик морських вод в акваторії острова, відтворена за допомогою моделі. За умов багатоводного 2006 р. в часовому ході характеристик простежується наявність верхнього квазіоднорідного шару глибиною  $\approx 5$  м, в якому концентрується основна маса забруднювальних речовин. Глибше за шар сезонного пікноклину ( $\approx 15$  м) відносна концентрація нафтопродуктів не перевищує 5 % (від концентрації в дунайських водах), а патогенних мікроорганізмів – не більше 1 %. За умов маловодного 2007 р., через зменшення стоку, в акваторії о.Зміїний зменшується блокуючий ефект сезонного пікноклину, верхній квазіоднорідний шар виражений більш чітко і заглиблюється до

10 м. Проникнення забруднених дунайських вод в акваторію о.Зміїний носить епізодичний характер і обмежується нижньою межею верхнього квазіоднорідного шару.

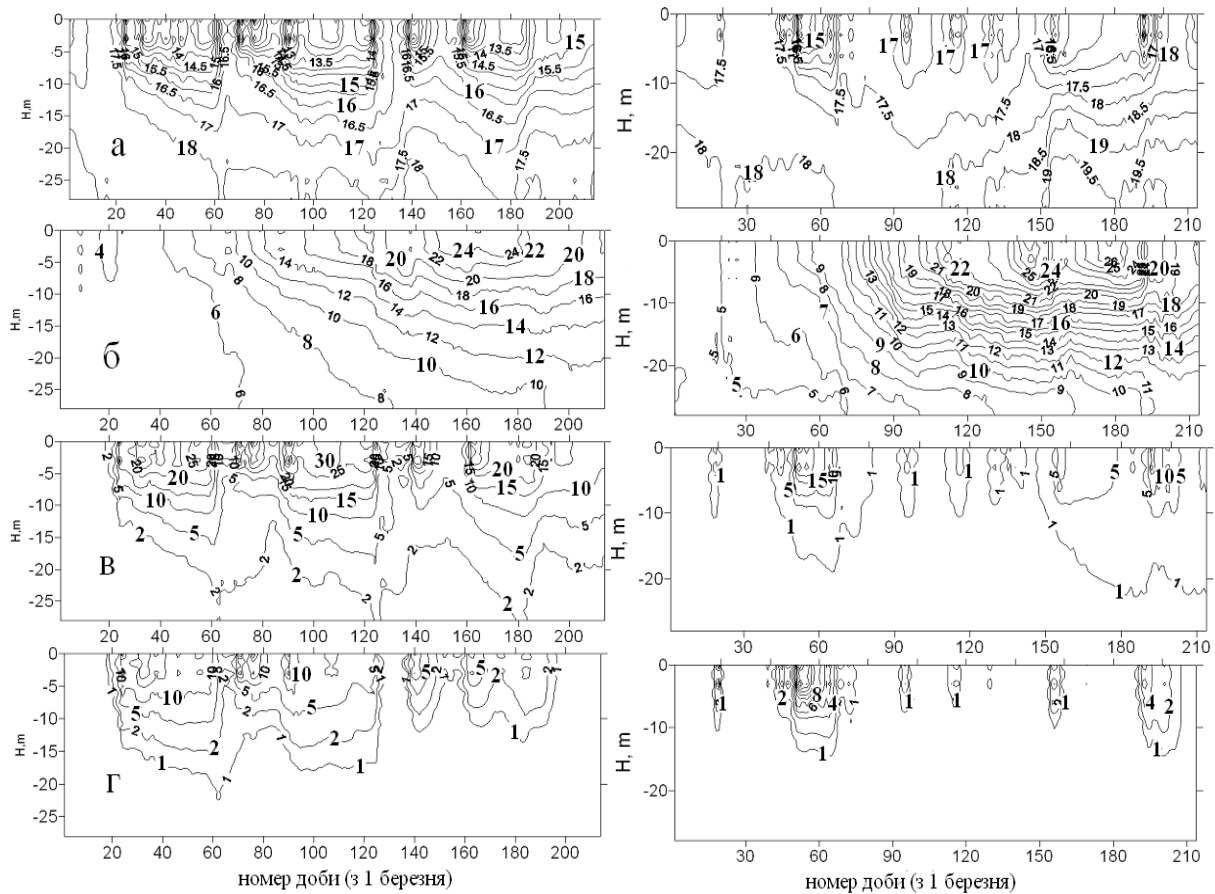


Рис. 8 – Розрахована за допомогою моделі часова мінливість вертикального розподілу солоності (а), ‰, температури води (б), °С, концентрації нафтопродуктів (в) і патогенних мікроорганізмів (г), %, в акваторії о.Зміїний за гідрометеорологічних умов 2006 р. (праворуч) та 2007 р. (ліворуч).

**Висновки.** Моделювання впливу стоку річки Дунай на формування якості морських вод на ділянці гирло річки Дунай – о. Зміїний за різних гідрометеорологічних умов (по роках різної водності р.Дунай, вітрових умов) показало, що розповсюдження трансформованих дунайських вод на акваторії західної половини північно-західної частини Чорного моря, а також ступінь впливу стоку р.Дунай на мінливість гідрологічних і гідрохімічних характеристик, екологічний стан вод в акваторії о.Зміїний і на ділянці гирло р. Дунай-о.Зміїний визначається як об'ємами річкового стоку і тенденцією їх мінливості, так і поточними вітровими умовами. У багатоводні роки акваторія о.Зміїний знаходиться в основному в зоні вторинної трансформації дунайських вод, а в маловодні – в зоні повної їх трансформації. Часова мінливість рівня забруднення вод поверхневого

шару акваторії о.Зміїний добре корелює з солоністю. Максимумам солоності відповідають мінімальні концентрації забруднювальних речовин і навпаки. Час добігання дунайських вод до акваторії о.Зміїний в період паводка становить приблизно 20-40 діб.

За гідрометеорологічних умов 2006 р. підвищення солоності і зниження рівня забруднення вод акваторії о.Зміїний пов'язано з посиленням або тривалою дією вітрів зі східною складовою (нагінних - притискаючих до берега). Вітри із західною складовою (згінно-віджимні) менш сильні і тривалі, тому на площу розповсюдження дунайських вод впливають менше. За умов 2007 р. забруднення вод поверхневого шару акваторії о.Зміїний забруднювальними речовинами, що надходять зі стоком р. Дунай, носить епізодичний характер і пов'язане з посиленням вітрів із західною складовою (відгінних).

Основна маса забруднювальних речовин, що надходять із стоком р. Дунай, концентрується в межах верхнього квазіоднорідного шару моря, глибина якого в маловодні роки збільшується. У поверхневому шарі вод акваторії о.Зміїний максимальна концентрація нафтопродуктів може досягати 30 – 45 % (від концентрації в дунайських водах), а патогенних мікроорганізмів – 25 – 30 %.

#### Список літератури

1. *Большаков В.С.* Трансформация речных вод в Черном море – К: Наукова думка, 1970.-328 с.
2. *Природные условия* взморья реки Дунай и острова Змеиный: современное состояние экосистемы./ Под ред. В.А. Иванова, С.В. Гошовского – Севастополь, МГИ НАНУ .-1999.-268с.
3. *Тучковенко Ю.С., Иванов В.А.* Моделирование процессов формирования качества вод северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 2007.– Вып. 15.– С. 304 - 325.
4. *Тучковенко Ю.С.* Математическая модель формирования термохалинной структуры и циркуляции вод в лиманах, приустьевых и шельфовых областях северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 2003.– С. 138-153.
5. *Иванов В.А., Тучковенко Ю.С.* Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2006.- 368 с.
6. *Процессы самоочищения* морских вод от химических загрязнений / под ред. А.И. симонова. – М.: Гидрометеиздат, труды ГОИН.– 1983.– Вып.167. – 152 с.
7. *Mancini J.J.* Numerical Estimation of Coliform Mortality Rates under Various Conditions // Journal of Water Pollution Control Federation.-1978.- Vol.50 - P. 2477.
8. *Дослідження та прогнозування* впливу стоку річки Дунай на гідрологічні та гідохімічні характеристики морських вод на ділянці гирло річки Дунай – о. Зміїний. Звіт з НДР/ Одеськ. держ. екол. ун-т.– Одеса, 2009. – 323 с.
9. *Гидрология дельты Дуная* – Москва : ГЕС. - 2004.- 448 с.

10. *Виноградов К.А., Розенгурт М.Ш., Толмазин Д.М.* Атлас гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря.– К.:Наукова Думка, 1966.
11. *Гідрологічні та гідрохімічні* показники стану північно-західного шельфу Чорного моря: довідковий посібник. –К.: КНТ, 2008. – 616 с.

## SUMMARY

**Y.S. Tuchkovenko, O.A. Tuchkovenko**

### **MODELLING OF INFLUENCE OF FLOW R.DANUBE ON FORMATION OF QUALITY OF SEA WATER IN WATER AREA OF ZMIINYI ISLAND**

The results of modelling of the distribution of transformed waters of the Danube, as well as various types of pollutants which come with the river flow of the Danube into the aquatoriae of the north-western part of the Black Sea, including the area of the river Danube Mouth - Zmiinyi Island, under hydrometeorological conditions of 2006 (high water in Danube) and 2007 (low water) are presented.