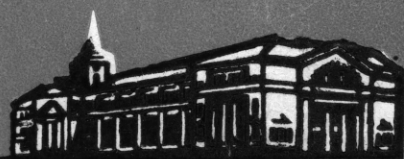


ВІСНИК

АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНСЬКОЇ РСР

2 ЛЮТИЙ
1 9 7 6



Прогноз зміни солоності та біологічних перебудов у Чорному морі на основі моделі його водного і сольового балансу в зв'язку з вилученням стоку рік

Г. Г. ПОЛІКАРПОВ, член-кореспондент АН УРСР,
В. І. ТИМОЩУК, кандидат географічних наук,
В. М. ЄГОРОВ

Нині Чорне море зазнає дедалі більшого впливу з боку людини. Одним з найважливіших факторів його є, зокрема, вилучення стоку рік, у тому числі Дунаю. Тому відчувається необхідність розробки прогнозу для Чорного моря на найближче майбутнє — кілька п'ятиріч. Проведені в широких масштабах дослідження [1, 2], чималою мірою виконані Інститутом біології південних морів АН УРСР та його Одеським відділенням, а також власні експедиційні матеріали дали авторам змогу запропонувати математичну модель водного і сольового балансу Чорного моря.

При побудові моделі враховані складові водного балансу, і швидкість зміни об'єму Чорного моря V виражена так:

$$\frac{dV}{dt} = Q_n - Q_v + f_{ка} - f_{ак} + F + P - E, \quad (1)$$

де Q_n , Q_v і $f_{ка}$, $f_{ак}$ — відповідно швидкості надходження і виходу водних мас крізь протоки Босфор і Керченську; F — річний стік рік; P — річне надходження опадів; E — швидкість випаровування води з поверхні моря.

Короткоперіодичні й аперіодичні коливання величин, з яких складається водний баланс, не позначаються на середньому багаторічному рівні Чорного моря. Тому можна прийняти

$$Q_n - Q_v + f_{ка} - f_{ак} + F + P - E = 0. \quad (2)$$

Вважаючи, що солоність є консервативним фактором щодо варіабільності складових водного балансу, нижче ми використовували осереднені оцінки параметрів формули (2).

Середньорічна величина випаровування з поверхні моря дорівнює $E = 326 \text{ км}^3$; опади над дзеркалом моря становлять $P = 116 \text{ км}^3/\text{рік}$ [3]. Величину стоку рік F визначено за гідрологічними щорічниками. Для рівнів забезпеченості від 95 до 10% сумарний середньорічний стік головних рік басейну Чорного моря (Дунаю, Дніпра, Південного Бугу, Дністра, Ріоні, Чороха) перебуває в межах від 198 до 384 км^3 . За даними Альтмана [4] — Самойленка [5], надходження води з Азовського моря $f_{ка}$ дорівнює від 88 до 121, в середньому ж 92 $\text{км}^3/\text{рік}$; $f_{ак}$ коливається у межах 63—96, або в середньому 66 $\text{км}^3/\text{рік}$. Решта водного балансу

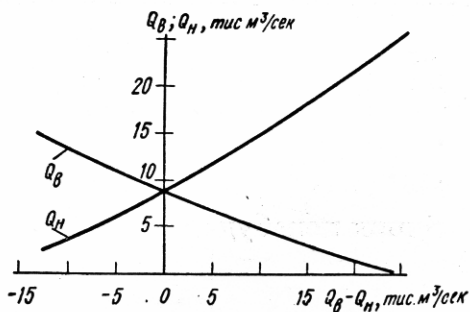


Рис. 1. Залежність між різницею витрат течій через протоку Босфор і витратами її верхньої й нижньої течій.

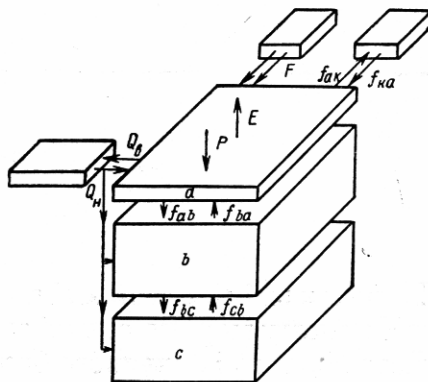


Рис. 2. Структура динаміки вод Чорного моря: a — поверхневий шар; b — проміжний шар; c — придонний шар; E — випаровування; P — опади; F — річковий стік; Q_B, Q_H — відповідно стік і приплив через Босфор; f_{ak}, f_{ka} — відповідно стік і приплив через Керченську протоку; $f_{ab}, f_{ba}, f_{bc}, f_{cb}$ — водообмін між шарами.

підтримується різницею верхньої Q_B і нижньої Q_H течій Босфору. При 95% забезпеченості стоку рік різниця $Q_B - Q_H$, підрахована з формули (2), досягає $6,5 \text{ км}^3/\text{рік}$, а при 10% забезпеченості $Q_B - Q_H = 192 \text{ км}^3/\text{рік}$.

Очевидно, що скорочення стоку рік супроводжуватиметься зменшенням різниці рівня між Середземним і Чорним морями і зміною водообміну крізь Босфор за рахунок зниження витрат верхньої Q_B і збільшення витрат нижньої Q_H течій. Величину потоків Q_B і Q_H можна визначити за залежністю між результирующим потоком крізь Босфор і верхньою й нижньою його течіями (рис. 1), побудованою нами за розрахунками А. К. Богданової [6]. З рисунка бачимо, що при 95% забезпеченості стоку рік витрати верхньої течії Босфору Q_B становлять $280 \text{ км}^3/\text{рік}$, а нижньої Q_H — $274 \text{ км}^3/\text{рік}$. При 10% забезпеченості вони дорівнюють відповідно 384 і $198 \text{ км}^3/\text{рік}$.

За даними водного балансу можна побудувати модель сольового балансу для оцінки сподіваної зміни солоності води моря в зв'язку зі зміною величини річкового стоку й водообміну крізь Босфор. Модель сольового балансу основана на структурі, що її ілюструє рис. 2.

З метою моделювання припускаємо, що перемішування вод у межах кожного шару відбувається моментально. Поверхнева водна маса (шар a) залягає на глибині 0–150 м; середня водна маса (шар b) — на глибині від 150 до 1000 м; глибинна водна маса (шар c) — на глибині понад 1000 м. Поверхневий шар обмінюється водами з потоками і середнім шаром, до якого надходить стік рік і з якого відбувається випаровування. Середній шар обмінюється водами з поверхневим і нижнім; до нього крізь Босфор можуть також надходити води з Мармурового моря. Глибинний шар обмінюється водами лише з середнім. Встановлено, що обмін між шарами, за показаними на рис. 2 комунікаціями, відбувається зі сталими швидкостями. Винесення солей за берегову лінію та випадання в осадок не враховується.

Глибини залягання і характеристики водних мас взято з класичних схем по Чорному морю. Оскільки результати моделювання розглядаються за відносно великі проміжки часу, періодом встановлення гомогальності водних мас можна знехтувати [7].

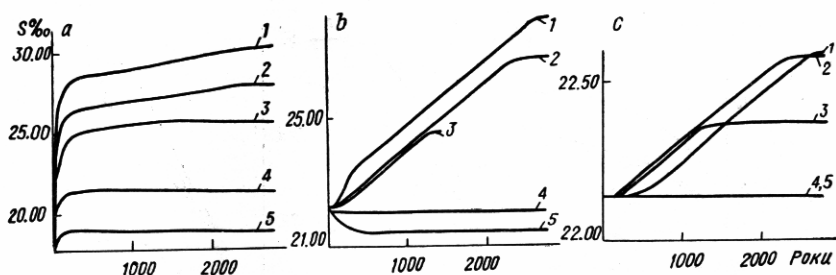


Рис. 3. Зміна солоності: *a* — поверхневого; *b* — проміжного; *c* — придонного шарів Чорного моря при надходженні вод з Мармурового моря лише у поверхневий шар при коефіцієнті вертикальної турбулентної дифузії $0,2 \cdot 10^{-4}$ см/сек і забезпеченості стоку 95, 75, 50, 25, 10% (відповідно 1, 2, 3, 4, 5).

Прийняті обмеження дають змогу представити модель сольового балансу в такому вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{dS_a}{dt} &= \frac{1}{V_a} (Q_n S_0 - Q_b S_a + f_{ka} S_k - f_{ak} S_a - f_{ab} S_a + f_{ba} S_b); \\ \frac{dS_b}{dt} &= \frac{1}{V_b} (f_{ab} S_a - f_{ba} S_b + f_{cb} S_c - f_{bc} S_b + f_b S_0); \\ \frac{dS_c}{dt} &= \frac{1}{V_c} (f_{bc} S_b - f_{cb} S_c), \end{aligned} \quad (3)$$

де f_{ij} — швидкості обміну вод між шарами; f_b — швидкість надходження вод з Босфору в середній шар; S_a , S_b , S_c і V_a , V_b , V_c — відповідно солоності і об'єми поверхневого, середнього і глибинного шарів; S_0 — солоність вод Мармурового моря; S_k — солоність вод Азовського моря. У рівняннях (3) $S_a(0) = 18,0 ‰$; $S_b(0) = 22,2 ‰$; $S_c(0) = 22,4 ‰$; $S_k = 12,0 ‰$; $S_0 = 34,9 ‰$; $V_a = 23195 \text{ км}^3$; $V_b = 274463 \text{ км}^3$; $V_c = 248390 \text{ км}^3$.

З визначених різними авторами швидкостей вертикального водообміну використані мінімальна, що дорівнює $0,15 \div 0,20 \cdot 10^{-4}$ см/сек [8], і максимальна — $0,64 \cdot 10^{-3}$ см/сек [9].

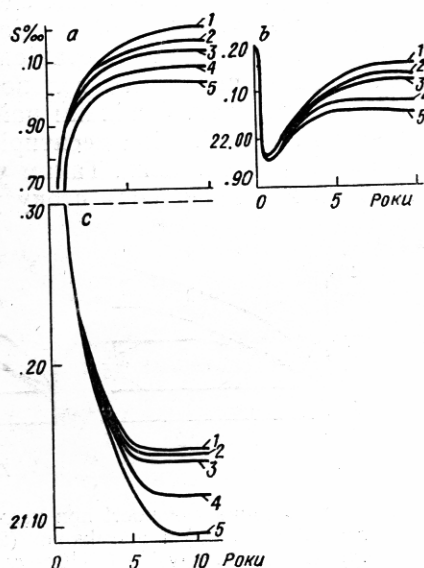
Розрахунок сподіваних змін солоності виконано у трьох варіантах і для кожного з них — з 95, 75, 50, 25 і 10% забезпеченістю стоку рік.

Варіант 1. Води з Мармурового моря надходять лише до поверхневого шару *a*:

а) швидкість водообміну між шарами досягає $0,2 \cdot 10^{-4}$ см/сек, при якій $f_{ab} = f_{ba} = f_{bc} = f_{cb} = 200 \text{ км}^3/\text{рік}$;

б) швидкість водообміну між шарами дорівнює $0,64 \cdot 10^{-3}$ см/сек, при якій $f_{ab} = f_{ba} = f_{bc} = f_{cb} = 65500 \text{ км}^3/\text{рік}$.

Рис. 4. Зміна солоності при надходженні вод з Мармурового моря лише у поверхневий шар при коефіцієнті вертикальної турбулентної дифузії $0,64 \cdot 10^{-3}$ см/сек. Позначення такі самі, як на рис. 3.



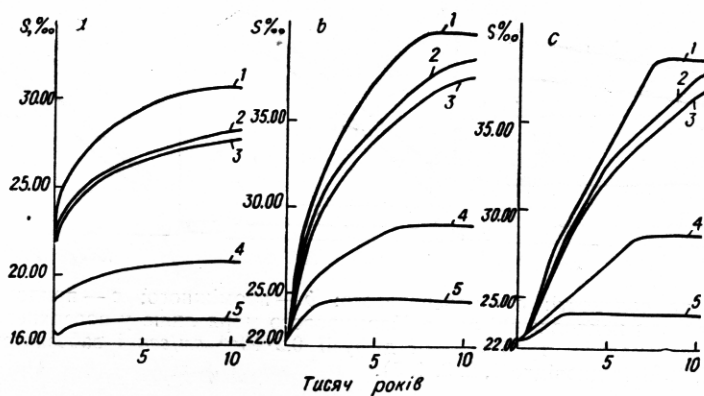


Рис. 5. Зміна солоності: *a* — поверхневого; *b* — проміжного; *c* — придонного шарів Чорного моря при надходженні вод з Мармурового моря у поверхневий (75%) і проміжний (25%) шари при коефіцієнті вертикальної турбулентної дифузії $0,2 \cdot 10^{-4}$ см/сек і забезпеченості стоку 95, 75, 50, 25, 10% (відповідно 1, 2, 3, 4, 5).

Результати розрахунку можна побачити на рисунках 3, 4.

Варіант 2. Води з Мармурового моря надходять як до верхнього (75% Q_n), так і до середнього (25% Q_n) шарів. Умови *a*) і *б*) такі самі, як і у варіанті 1. Результати розрахунку показані на рисунках 5, 6.

Варіант 3. Води з Мармурового моря надходять тільки до поверхневого шару. Водобіж між шарами *a*, *b* і *c* не відбувається. Результати розрахунку наведені на рис. 7.

Як бачимо, в стаціонарних умовах солоності шарів найменше відрізняються від тих, що спостерігаються, лише при 10% забезпеченості стоку рік. Це можна пояснити тим, що використовувана в моделі загальноприйнята прісноводна складова занижена відносно реальної за рахунок неврахованого схилового стоку рік південного й західного узбережжя Чорного моря. Очевидно, величину 10% забезпеченості слід розглядати як середню забезпеченість стоку рік, і тенденція зміни солоності має визначатися відносно цієї оцінки.

Незважаючи на різні умови окремих варіантів, аналіз кривих зміни солоності (рис. 3—6) виявляє здебільшого ділянки інтенсивної зміни солоності в початковий період, ділянки переходу до більш уповільненого процесу і ділянки власне стаціонарного стану. Помітно, що на ділянках кривих динамічної зміни солоності впливом водобіжів між шарами можна знехтувати. Оскільки найдоцільніше визначити тенденцію зміни солоності на найближчі десятиріччя, оцінку слід робити по більш динамічних ділянках кривих. Таким умовам відповідають криві, показані на рис. 7. Отже, зменшення стоку рік на величину, що дорівнює різниці

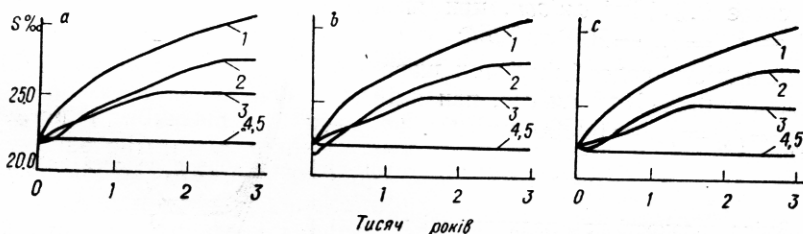


Рис. 6. Зміна солоності при надходженні вод з Мармурового моря у поверхневий (75%) і проміжний (25%) шари при коефіцієнті вертикальної турбулентної дифузії $0,64 \cdot 10^{-3}$ см/сек. Позначення такі самі, як на рис. 5.

між 10 і 50% та 10 і 75% забезпеченостями, спричинить підвищення солоності водних мас шару 0—150 метрів з 18 до 21—22 проміле за 25—30 років.

Збільшення солоності Чорного моря в цілому посилить природні процеси медитерані-

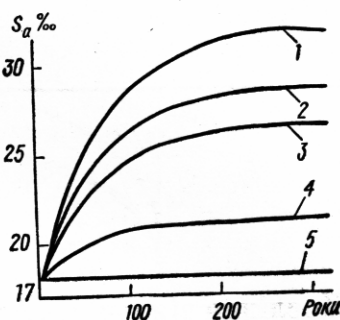


Рис. 7. Зміна солоності поверхневого шару Чорного моря при надходженні вод з Мармурового моря і відсутності водообміну між шарами.

зації фауни і флори цього моря, тобто заселення його середземноморськими рослинами і тваринами [10]. Наступ морських вод на перекриті гирла рік і прісноводних лиманів спричиняє, за даними члена-кореспондента АН УРСР Ю. П. Зайцева, понтизацію останніх, тобто вселення чорноморських видів замість прісноводних [9, 11]. Названі процеси самі по собі означають докорінну перебудову біологічної структури Чорного моря, зокрема його північно-західної частини.

Зміна солоності справляє складний вплив на процеси мінерального обміну ряду хімічних елементів у чорноморських рослин [12].

Зростання солоності Чорного моря має бути враховане також з погляду морського транспорту й портових споруд.

Під час експедицій Інституту біології південних морів АН УРСР було показано, що верхня межа сірководню може досягати 100-метрового горизонту. Ряд чорноморських організмів, зокрема донні риби, живуть на глибинах кілька десятків метрів, тобто поблизу вказаної межі. Евтрофування, забруднення та інтоксикація чорноморських вод можуть спричиняти локальні осередки сірководневого зараження, як це сталося, наприклад, неподалік дельти Дунаю [11]. Очевидно, доцільно продовжувати спостереження над рівнем сірководневого шару в Чорному морі для з'ясування його дальшої динаміки.

Література

1. Исследования ИнБЮМ в Средиземноморском бассейне. Библиографический обзор (1957—1968 гг.). «Наукова думка», К., 1970.
2. The Black sea. Its Geology, Chemistry, Biology. A bibliography. By Ph. N. Laking. Woods Hole, 1974.
3. Солянкин Е. В. Влагооборот в Черном море. «Океанология», т. 2, вып. 2, 1962.
4. Альтман Э. Н. Водообмен через Керченский пролив в условиях зарегулирования стока рек Азовского бассейна. «Океанология», т. 13, вып. 3, 1973.
5. Самойленко В. С. Ближайшее будущее Азовского моря. «Труды ГОИН», 1947, вып. 3 (15).
6. Богданова А. К. Сезонные и межгодовые колебания водообмена через Босфор. У кн. «Биология моря», вып. 27. «Наукова думка», К., 1972.
7. Богуславский С. Г., Хлопушина С. И. Водообмен через Босфор и солёность Черного моря. У кн. «Морские гидрофизические исследования», № 3 (62). Вид. МГИ АН УРСР, Севастополь, 1973.
8. Глазков В. В. Объёмный статистический Т, S-анализ водных масс Черного моря. «Океанология», т. 10, вып. 6, 1970.
9. Беляев В. И., Колесников А. Г., Нелепо Б. А. Определение скорости радиоактивного заражения Черного моря. Disposol of radioactive waters into seas JAEA. Vienna, 1966.
10. Пузанов И. И. Медитеранизация фауны Черного моря и перспективы ее усиления. «Зоологический журнал», т. 46, № 9, 1967.
11. «Миклухо-Маклай», 57-й рейс. «Химия и жизнь», 1974, № 8.
12. Поликарпов Г. Г., Кулебакина Л. Г. Способность водорослей накапливать радиостронций в воде разной солёности. У кн. «Радиоэкологические исследования Средиземного моря». «Наукова думка», К., 1970.