

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ АН УССР

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ. "ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ ЮЖНОГО РЕГИОНА УКРАИНЫ".

УДК 551.464.34:551.464.679

~ 6611-84 Дел.

А.Д. Земляной, А.П. Арбузова, Г.Ф. Батраков, В.Н. Еремеев,
Т.М. Иванова

ОБ ОБМЕНЕ CO_2 МЕЖДУ ЧЕРНЫМ МОРЕМ И АТМОСФЕРОЙ

В последние годы много внимания уделяется исследованиям обмена CO_2 между атмосферой и океаном. Интерес к таким исследованиям обусловлен возможным влиянием повышения содержания CO_2 в атмосфере на климат Земли и карбонатную систему океана. Для ряда регионов Мирового океана имеются оценки среднегодовых и среднесезонных потоков CO_2 через границу океан-атмосфера, но еще для многих регионов таких оценок или нет вообще, или они слишком грубы из-за недостаточной репрезентативности информации о содержании CO_2 в водах и скоростях обмена. Сейчас имеется только одна работа [4], посвященная расчету обменных потоков CO_2 между черноморскими водами и атмосферой. При этом в качестве скорости обмена была выбрана максимальная величина по литературным данным, не связанным с измерениями в Черном море.

В данной работе проводится оценка среднегодового потока CO_2 между Черным морем и атмосферой с помощью величины скорости обмена, найденной исходя из баланса радиоуглерода от ядерных взрывов в черноморских водах, основанного на измерениях концентрации C^{14} во время экспедиции "Одиссей-65" летом 1965 г. [12].

Методическая схема, использованная авторами, позволяла определять содержание радиоуглерода в неорганическом углероде (карбонатная система). Значения относительной концентрации выражены в виде отношения (A/A_0) удельных активностей

углерода образца и эталона. В абсолютных величинах (в атомах на единицу объема воды) концентрация N определяется соотношением:

$$N = \left(\frac{A}{A_0} \right) \cdot C \cdot \frac{A_0 \mu}{\lambda},$$

где C - концентрация $\sum CO_2$ в молях на единицу объема воды, μ - грамм-атомный вес стабильного углерода, λ - постоянная распада радиоуглерода. Введем безразмерную концентрацию радиоуглерода:

$$n = \frac{N}{C_0} \cdot \frac{\lambda}{A_0 \mu} = \left(\frac{A}{A_0} \right) \cdot \frac{C}{C_0},$$

где C_0 - поверхностная концентрация $\sum CO_2$. Распределение отношения C/C_0 получено осреднением имеющихся данных I 5,7, 8 I. На рисунке приведены осредненные профили величин (A/A_0) из I I2 I, C/C_0 и их произведение n . Экспериментальные точки, показанные на рисунке, получены осреднением результатов измерений на близких горизонтах. Как можно видеть, профиль абсолютной концентрации заметно отличается от профиля относительной концентрации (A/A_0) . Это является следствием активного участия углерода в биологических процессах. Аналогичная картина наблюдается и для изотопа кремния-32 [13]:

Согласно оценке I I2 I поверхностное значение (A/A_0) для радиоуглерода естественного происхождения равно 1,03 ($\Delta C^{14} \approx -20$). Данные в Тихом океане на средних широтах северного полушария (I 9 I, рис. 2) показывают, что до 1965 года радиоуглерод от ядерных взрывов проник в слой толщиной менее 200 м. Следует ожидать, что глубина проникновения "бомбового" радиоуглерода в Черном море не превышает эту величину.

Учет вышеизложенного позволяет восстановить профиль радиоуглерода естественного происхождения, как показано на рисунке пунктирной линией. Тогда заштрихованная площадь характеризует количество радиоуглерода от ядерных взрывов, накопившегося к середине 1965 года в водах Черного моря. Как можно видеть, она охватывает практически аэробную зону моря.

В дальнейшем все, что касается радиоуглерода, будет относиться только к его компоненте, обусловленной испытаниями

ядерного оружия.

Баланс радиоуглерода карбонатной системы моря можно записать в виде: $\frac{dQ}{dt} = f_{atm} + f_p + f_A^+ + f_B^+ - f_A^- - f_B^- + f_{bio} - \lambda Q$,

где $Q = \int_0^{H(t)} n(z, t) S(z) dz$ ($H(t)$ - глубина проникновения радиоуглерода на момент t от начала испытаний ядерного оружия, $S(z)$ - площадь моря на горизонте z) представляет собой количество накопившегося в море радиоуглерода к моменту

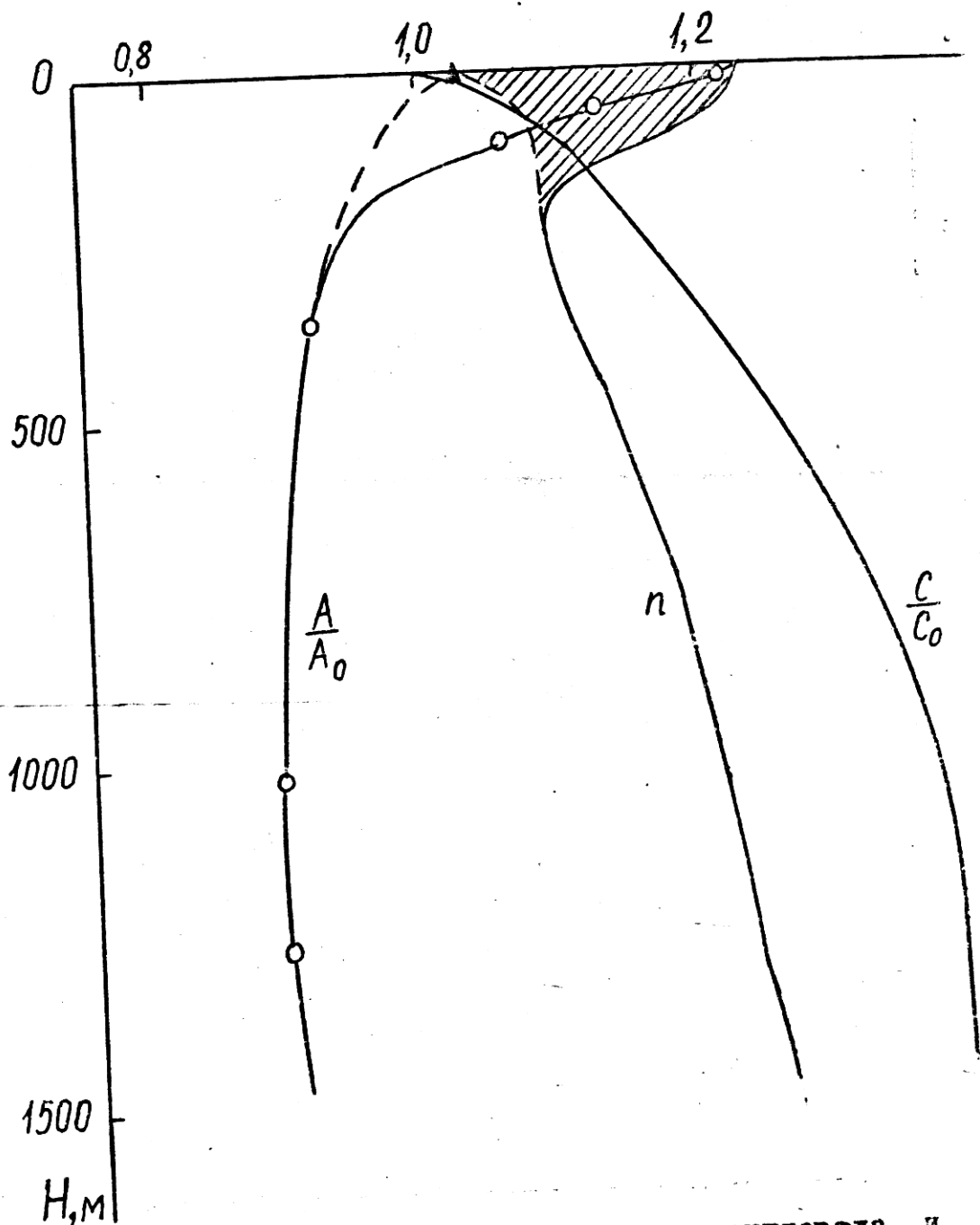


Рис. Осредненные вертикальные профили радиоуглерода и ΣCO_2 в водах Черного моря.

времени t . Величины в правой части описывают потоки радиоуглерода, связанные со следующими факторами: $f_{атм.}$ - обменом через поверхность раздела с атмосферой, f_p - речным стоком, f_A^+ и f_A^- - поступлением в Черное море азовских вод и вынос черноморских через Керченский пролив, f_B^+ и f_B^- - аналогично для Босфора, $f_{био}$ - фотосинтезом и разложением органического вещества, λA - радиоактивным распадом.

Величину $f_{атм.}$, учитывая главные процессы - молекулярный обмен через границу раздела с атмосферой и осадки, можно представить в виде:

$$f_{атм.} = K S_0 \frac{\alpha}{C_0} (P_{атм.} \frac{A}{A_0} - n_0 P_0) + L \frac{C_L}{C_0} (\frac{A}{A_0})_L,$$

где K - скорость обмена CO_2 через поверхность моря, α - растворимость CO_2 , $P_{атм.}$ и P_0 - парциальные давления CO_2 соответственно в атмосфере и поверхности моря, L - сумма осадков, C_L - концентрация ΣCO_2 в осадках, S_0 - площадь поверхности моря. Измерения показывают, что щелочность атмосферных осадков ничтожна $\pm 3 \pm$. Таким образом, ΣCO_2 в осадках представлена почти полностью CO_2 , и будем считать, что количество его находится в равновесии с атмосферой, т.е.

$$(\frac{A}{A_0})_L = (\frac{A}{A_0})_{атм.}$$

Можно считать, что речные воды поступают в поверхностный 50-метровый слой Черного моря, а глубже их влияние распространяется благодаря процессам вертикального обмена $\pm 1, 6 \pm$. Кроме того, полагаем равновесие речной карбонатной системы с атмосферой по радиоуглероду. Тогда:

$$f_p = v_p \frac{C_p}{C_0} (\frac{A}{A_0})_{атм.},$$

где v_p - поступление речных вод в единицу времени, C_p - концентрация ΣCO_2 в речной воде, $(A/A_0)_{атм.}$ - относится к атмосфере.

Обмен с Азовским морем осуществляется через мелкий Керченский пролив. При этом в Азовское море поступает поверхностная черноморская вода. Поскольку влияние речного стока в Азовском море значительно сильнее, нежели в Черном, а сама величина обмена вод между морями мала, то можно считать, что отношение (A/A_0) для азовских вод такое же, как для речных, т.е. по принятому выше предположению равно $(A/A_0)_{атм.}$

Тогда:

$$f_A^+ - f_A^- = v_A^+ \frac{C_A}{C_0} (\frac{A}{A_0})_{атм.} - v_A^- n_0,$$

где V_A^+ и V_A^- - объем азовских вод, поступающих в единицу времени в Черное море, и величина обратного потока из Черного моря в Азовское, соответственно; C_A - концентрация ΣCO_2 в азовских водах.

Верхнебосфорское течение в среднем охватывает в проливе ской около 45 м Г 2 I, при этом максимальный расход приходится на самые верхние горизонты. Поэтому будем полагать, что концентрация радиоуглерода верхнебосфорских вод соответствует концентрации поверхностной воды Черного моря, т.е.

$$f_B^- = V_B^- n_0,$$

где V_B^- - величина потока верхнебосфорского течения.

Органическое вещество, поступающее с речными водами (поступление органики из Мраморного и Азовского морей значительно меньше Г 8 I) представлено довольно устойчивыми гумусовыми соединениями, скорость разложения которых мала Г 8 I. Поэтому влиянием разложения речной органики мы пренебрегаем. Оценка Г 8 I показывает, что лишь около 20 % фотосинтетической продукции за год покидает аэробную зону, остальное разлагается внутри нее. Поскольку фотосинтез охватывает самые верхние слои моря, то можно записать:

$$f_{\text{био}} \approx -0,2 \frac{\Phi}{C_0} n_0$$

где Φ - первичная продукция Черного моря.

Поскольку постоянная распада радиоуглерода весьма мала ($\lambda = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$), то радиоактивным распадом за рассматриваемый период (1954-1965 гг.) пренебрегаем.

Введем обозначения: $b = \alpha P_0 / C_0$ и

$$M_A = \int_0^T \left(\frac{A}{A_0} \right)_{\text{атм.}} dt; \quad M_S = \int_0^T n_0 dt$$

Тогда:

$$\int_0^T \frac{dQ}{dt} dt = Q(T) = \kappa b \int_0^T \left(\frac{P_{\text{атм.}}}{P_0} M_A - M_S \right) + \left(V_P \frac{C_P}{C_0} + L \frac{C_L}{C_0} + V_A^+ \frac{C_A}{C_0} \right) M_A - \left(V_A^- + V_B^- + 0,2 \frac{\Phi}{C_0} \right) M_S,$$

откуда можно определить κ .

Для вычисления $Q(T)$ величины площадей Черного моря на различных горизонтах взяты из работы Г 1 I. Интеграл M_A вычислен по данным работы Г 14 I. Интеграл M_S вычислен в предположении, что кривые роста поверхностной концентрации "бомбового" радиоуглерода в Черном море и в океане Г 10 I, нормированные на величину этой концентрации на середину 1965 г., идентичны. Элементы водного баланса Черного моря и

величина первичной продукции взяты из монографии Скопинцева Б.А. I 8 I.

В последнем соотношении мы пренебрегли влиянием поступления мраморноморских вод в Черное море по следующим соображениям. Эти воды, имея вначале высокую плотность, быстро опускаются на значительные глубины Черного моря (так по измерениям I 2 I глубины 500 метров они достигают примерно за 3 суток) и смешиваются с глубинными черноморскими водами, объем которых во много раз превосходит объем поступающих ежегодно мраморноморских вод. Поэтому связанная с этим концентрация радиоуглерода на разных глубинах будет мала, и неучет поступления в верхние слои моря радиоуглерода из глубинных слоев лишь в очень незначительной степени изменит величину заштрихованной на рисунке площади, и потому пренебрежем этим изменением, т.е. полагаем

$$f_5^+ = 0$$

Согласно экспериментальным данным I 4, 5, 7 I средние значения $P_{\text{атм.}} = 3,21 \cdot 10^{-4}$ атм., $P_0 = 3,46 \cdot 10^{-4}$ атм. и $C_0 = 306 \cdot 10^{-5}$ моль/л. Отсюда находим δ равным 0,005 (принимая среднегодовую температуру поверхности Черного моря равной 15°C). Подстановка всех числовых величин в последнюю формулу дает $K = 35 \cdot 10^{-4}$ см/с. Беря среднегодовую температуру поверхностных черноморских вод равной 15°C , в рамках пленочной модели I II I находим толщину микрослоя (с чисто молекулярной диффузией), равной ~40 мкм, что в два раза больше величины, использованной в I 4 I.

Полученная оценка означает, что ежегодно Черное море выделяет в атмосферу $K \alpha (P_0 - P_{\text{атм.}}) \int_0^z \approx 22 \cdot 10^6$ тонн CO_2 , т.е. в 2 раза меньше, нежели найдено в работе I 4 I.

Литература

1. Богданова А.К. Водообмен через Босфор и его роль в перемешивании вод Черного моря. - Тр. Сев. биол. ст., 1959, т. 12, с. 401-420.
2. Водообмен через Босфор и его влияние на гидрологию и биологию Черного моря. Киев: Наукова думка, 1969. 295 с.
3. Еремеева Л.В., Безбородов А.А. Геохимия поверхности раз-

- дела океан-атмосфера. - Препринт 81-30, Киев, Изд-во ИГН АН УССР, 1981. 57 с.
4. Жоров В.А., Абакумова Т.Н., Совга Е.Е., Ляшенко С.В. Об обмене CO_2 между морем и атмосферой в некоторых районах Черного моря. - Океанология, 1981, т.21, № 1, с. 55-62.
 5. Жоров В.А., Богуславский С.Г., Абакумова Т.Н. Распределение щелочности, неорганического углерода и величин степени насыщенности вод карбонатом кальция в Черном море летом. - Гидрохимические материалы, 1981, т.90, с.51-57.
 6. Колесников А.Г., Богуславский С.Г. Вертикальный перенос в Черном море. - Морские гидрофизические исследования, Севастополь, Изд-во МГИ АН УССР, 1978, вып.2, с. 33-46.
 7. Комплексные океанографические исследования Черного моря. (Богуславский С.Г., Ефимов В.В., Черкесов Л.В. и др.), Киев: Наукова думка, 1980. 240 с.
 8. Скопинцев Б.А. Формирование современного химического состава вод Черного моря. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 336 с.
 9. Bien G., Suess H. Transfer and exchange of ^{14}C between the atmosphere and the surface water of the Pacific ocean. - Proc. sympos. "Radioactive dating and methods of low-level counting". 2-10 march 1967, Monaco, IAEA, Vienna, 1967, p. 105-115.
 10. Broecker W.S., Peng T.H., Engh R. Modeling the carbon system. - Radiocarbon, 1980, v. 22, No 3, p. 565-598.
 11. Broecker W.S., Peng T.H. Gas exchange rates between air and sea. - Tellus, 1974, v. 26, No 1-2, p. 22-35.
 12. Östlund H.G. Expedition "Odysseus-65". Radiocarbon age of Black Sea deep water. - In: The Black Sea - geology, chemistry and biology, 1974, Tulsa, Okla, USA, p. 127-132.
 13. Somayajulu B.L.K., Lal D., Craig H. Silicon-32 profiles in the South Pacific. - Earth and Planet. Sci. Lett., 1973, v. 18, No 1, p. 181-188.
 14. Vogel J.C. Radiocarbon in the surface waters of the Atlantic ocean. - Proc. of 8-th Int. Radiocarbon Dating Conf., Lower Hutt, 1972, v.1, Wellington, s.a., c43-c55.