

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАПАСА ^{137}Cs В ЧЕРНОМ МОРЕ

Т.В. Чудиновских, О.А. Дымова

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: chudtv_50@mail.ru

В работе выполнена оценка составляющих бюджета ^{137}Cs в Черном море за период с 1986 по 2004 гг. Расчеты основаны на данных радиоэкологического мониторинга и численного моделирования эволюции поля концентрации радиоактивного цезия. Информация о реально наблюдаемом вкладе ^{137}Cs в компоненты экосистемы Черного моря используется для задания начальных и граничных условий в численной модели.

Введение. Черное море является уникальным бассейном по своим физическим, химическим и биологическим характеристикам в силу его обособленности от Мирового океана. Этим объясняется его особая притягательность в качестве объекта для научных исследований. Чернобыльская катастрофа, в результате которой на акваторию Черного моря залпово поступили радиоактивные продукты, превратила его в идеальный полигон не только для радиоэкологических, но и гидрофизических исследований.

Косвенные методы исследований процессов циркуляции водных масс получили в настоящее время широкое распространение [1 – 3]. Они основаны на анализе перемещений некоторой пассивной примеси – трассера, который не оказывает влияния на гидродинамические характеристики. Изотопные методы исследований являются не только удобным инструментом для качественной и количественной оценки процессов обмена, но в ряде случаев позволяют уточнить представления о физическом механизме переноса вод и формировании потоков вещества в толще бассейна [4].

Для решения задачи распространения радиоактивного трассера в морском бассейне необходимо знать не только ос-

новные уравнения процессов, в которые он вовлекается. Получение корректного решения возможно лишь при правильном задании начальных и граничных условий. Задание краевых условий представляет наибольшую трудность при использовании радионуклидов в качестве трассеров гидродинамических процессов. Требуется не только расписать баланс каждого радионуклида, но и оценить вклад каждой его компоненты. Качество проводимых оценок определяется двумя факторами – точностью оценок составляющих водного баланса Черного моря и достоверностью результатов радионуклидных наблюдений.

На протяжении первых десяти лет после аварии на ЧАЭС в Черном море проводились регулярные радиоэкологические исследования, на основании которых был сделан анализ временной и пространственной изменчивости полей радионуклидов [5 – 9]. Были выполнены оценки составляющих баланса изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr в водах Черного моря [1, 3, 9]. Однако разные исследователи приводят данные, значительно различающиеся между собой. Основная причина расхождения полученных оценок – использование преимущественно собственных результатов наблюдений, количество которых в большинстве случаев ограничено. Анализ опубликованных результатов радионуклидных исследований, проводимых в Черном море разными научными центрами, позволяет прийти к заключению, что на протяжении 10 лет не было выполнено ни одной съемки, покрывающей акваторию бассейна с достаточной обеспеченностью.

Материалы и методы. Оценки и расчеты выполнены на основе результатов радиоэкологического мониторинга Черноморского бассейна, который проводился на научно-исследовательских судах МГИ НАНУ, ИнБЮМ НАНУ, НПО «Тайфун» (г. Обнинск), МО УкрНИГМИ и Woods Hole Oceanographic Institute (США) в 1986 – 1998 гг. [4 – 9]. Водный баланс Черного моря для 1986 – 2005 гг. посчитан по методике, разработанной в бывшем СО ГОИНе (ныне МО УкрНИГМИ) [10]. Оценки послонного запаса радионуклидов выполнены с использованием результатов численного

моделирования переноса пассивной примеси в Черном море.

Комплексная модель. Для расчета распространения радионуклидов в Черном море использовалась трехмерная нелинейная термогидродинамическая модель МГИ, которая была дополнена блоком распространения пассивной примеси [11]. В задаче предполагается, что радиоактивные вещества являются пассивной примесью, не влияющей на гидродинамические характеристики. Поэтому распространение радионуклидов в водной среде описывалось уравнением:

$$\frac{dC}{dt} = -A_H \nabla^4 C + (A_V C_z)_z + F, \quad (1)$$

где C – концентрация радионуклида, F – член, описывающий источники и стоки радионуклидов. Сток радионуклидов внутри бассейна происходит за счет радиоактивного распада:

$$F = C_0 e^{-0.69 \frac{t}{T}}, \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация ^{137}Cs , T – период полураспада ^{137}Cs . Использовались следующие краевые условия для уравнения (1). На поверхности $z = 0$ задается поток из атмосферы, величина которого равномерно распределяется по всей площади моря:

$$A_V C_z = C_{atm}(t). \quad (3)$$

На дне $z = H(x, y)$:

$$C_z = 0. \quad (4)$$

На твердых участках боковой границы, в устьях рек и проливах поток отсутствует:

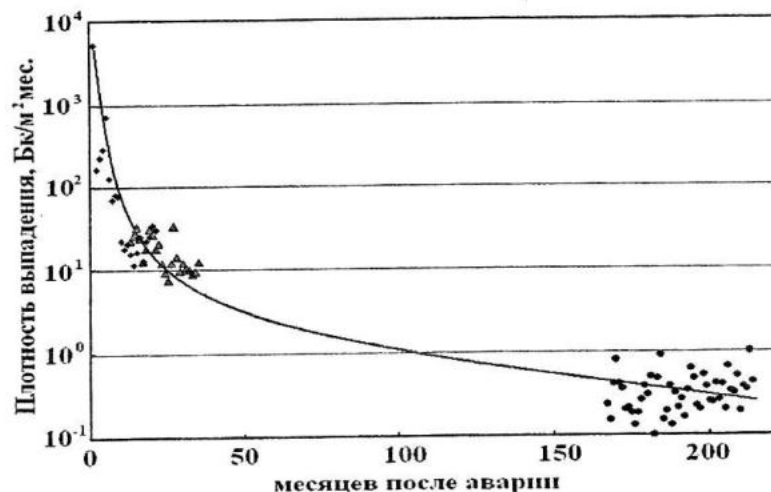
$$\partial C / \partial n = 0, \quad \partial(\nabla^2 C) / \partial n = 0. \quad (5)$$

В начальный момент времени выполняется условие:

$$C = C^0(x, y, z). \quad (6)$$

Задание граничных и начальных условий. Поскольку прямые измерения плотности выпадения радиоизотопов на акваторию моря не проводились, то при задании потока из атмосферы были использованы косвенные методы оценки величины потока. Для расчета использовались результаты измерений концентрации ^{137}Cs и плотности выпадения суммы β -активных радиоизотопов в приземном слое атмосферы. Результаты расчетов приведены на рис. 1. Для аппроксимации выбрана степенная функция, уравнение которой записывается в виде:

$$C_{atm}(t) = 2122,5 \cdot t^{-1,67} \quad (7)$$



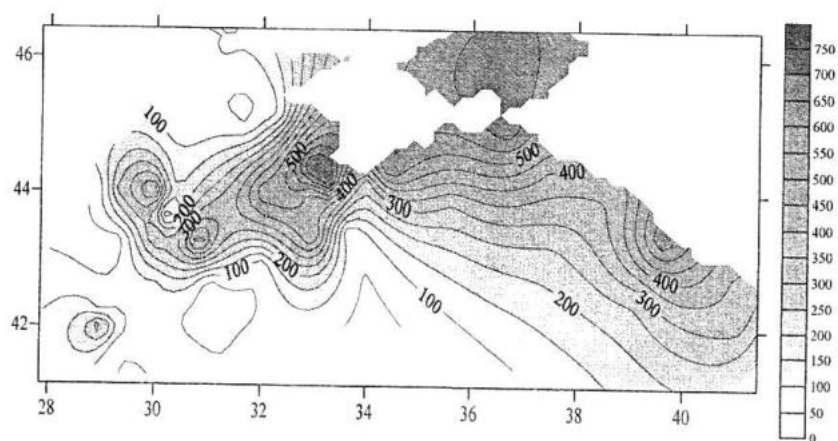
Р и с. 1. Изменчивость плотности выпадения ^{137}Cs из атмосферы в Черноморском регионе в 1986–2004 гг: \blacklozenge – рассчитаны по суммарной β -активности; \blacktriangle – рассчитаны по концентрации ^{137}Cs в приземном слое воздуха; \bullet – данные ЦГО Украины, осредненные для черноморских пунктов наблюдения

где $C_{атт}$ – суммарная за месяц плотность выпадения ^{137}Cs ; t – количество месяцев прошедших с момента аварии на ЧАЭС (в Черноморском бассейне чернобыльские атмосферные выпадения начались 1 мая 1986 г.). Коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,946$.

Исходя из результатов расчетов и учитывая распределение осадков над Черным морем в 1986 г, поток ^{137}Cs на акваторию моря с атмосферными выпадениями оценивается величиной $2,91 \cdot 10^{15}$ Бк. В последующие два года

суммарный поток радиоактивного цезия составил еще $1,95 \cdot 10^{14}$ Бк. Для оценки потока цезия в период 1989 – 2005 гг. использовалось уравнение (7). Суммарное количество радиоизотопа, поступившего на поверхность Черного моря за этот период, составило $9,33 \cdot 10^{13}$ Бк.

Начальное поле концентрации ^{137}Cs представлено на рис. 2. Для его построения использован массив, сформированный из данных съемок, выполненной в июне 1986 г. [4 – 6].



Р и с. 2. Начальное поле концентрации ^{137}Cs , построенное по результатам натуральных наблюдений, выполненных в июне 1986 г.

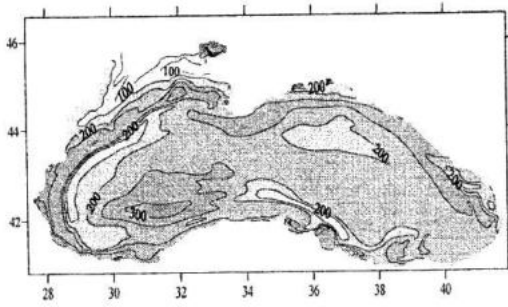
Численные эксперименты. При проведении расчетов использовались климатические поля термогидродинамических характеристик. Расчеты проводились на горизонтальной сетке 5×5 км, по вертикали использовалось 45 горизонтов с глубинами 2,5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 63, 75, 88, 100, 113, 125, 150, 175, 200, 250, далее через каждые 50 м до 600, затем через 100 м до 2000, 2050, 2075, 2085, 2095, 2100 м. Шаг по времени равнялся 5 мин. Коэффициенты горизонтальной турбулентной диффузии в уравнении (1): $A_H = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^4 \text{ с}^{-1}$.

Интегрирование уравнений модели было выполнено на три года. Проведено два численных эксперимента с различными коэффициентами вертикальной турбулентной диффузии. В первом задавалось постоянное для каждого горизонта значение параметра A_V [11]. Во втором эксперименте при описании вертикального обмена использовалось приближение Филандера – Покановски [12].

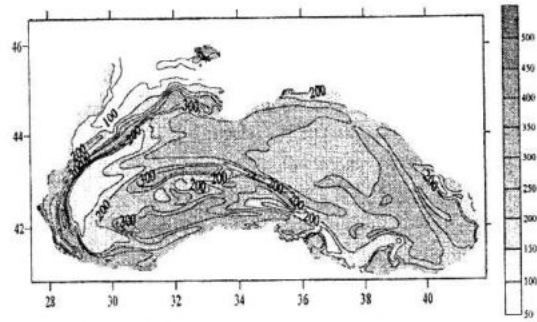
Получены поля концентрации ^{137}Cs на каждые сутки времени интегрирования для всех исследуемых горизонтов.

Сравнение результатов расчетов показало, что использование параметризации Филандера – Покановски позволяет более точно описать эволюцию поля концентрации ^{137}Cs . На рис. 3 (численный эксперимент 1) и 4 (численный эксперимент 2) представлены поля концентрации для 10 декабря 1986 г. Видно, что во втором расчете наблюдаются более тонкие эффекты в структуре поля ^{137}Cs .

Модельные данные сравнивались с данными натурной съемки, выполненной в 14 рейсе НИС «Профессор Колесников» в период с 24 ноября по 20 декабря 1986 г. Для этого расчетные данные были усреднены за период проведения натуральных наблюдений и построено отношение модельной величины концентрации ^{137}Cs к наблюдаемой в каждой точке расчетной области для обоих экспериментов.



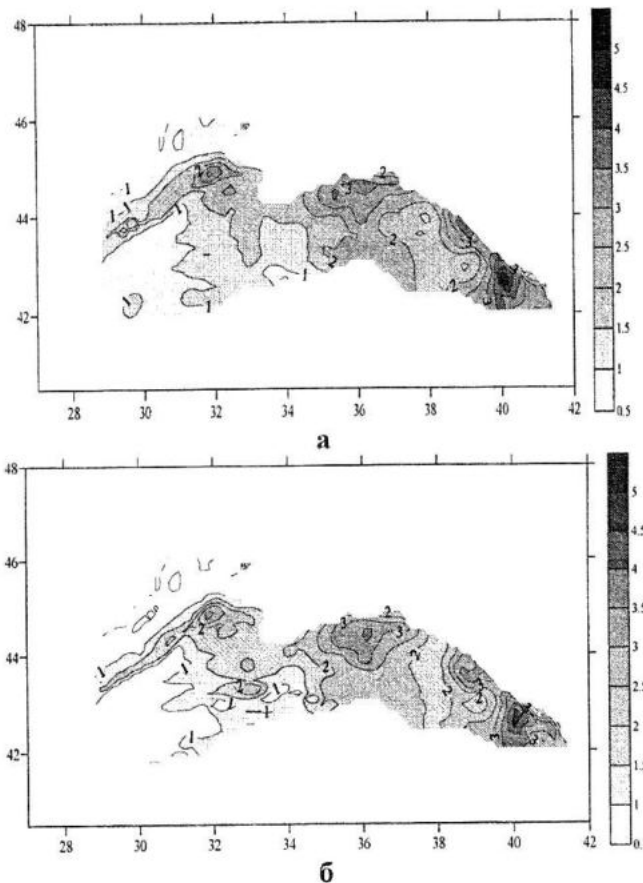
Р и с. 3. Модельное поле концентрации ^{137}Cs , полученное при задании постоянного для каждого горизонта значения параметра A_V



Р и с. 4. Модельное поле концентрации ^{137}Cs , полученное при использовании приближения Филандера – Покановски

На рис. 5 представлены результаты сравнения. Видно, что наибольшие отличия между модельными и натурными данными наблюдаются в восточной час-

ти моря. Здесь результаты численного эксперимента могут превышать результаты натурных наблюдений в 3 – 4 раза.



Р и с. 5. Отношение рассчитанной концентрации ^{137}Cs к наблюдаемой:
а – эксперимент 1, б – эксперимент 2

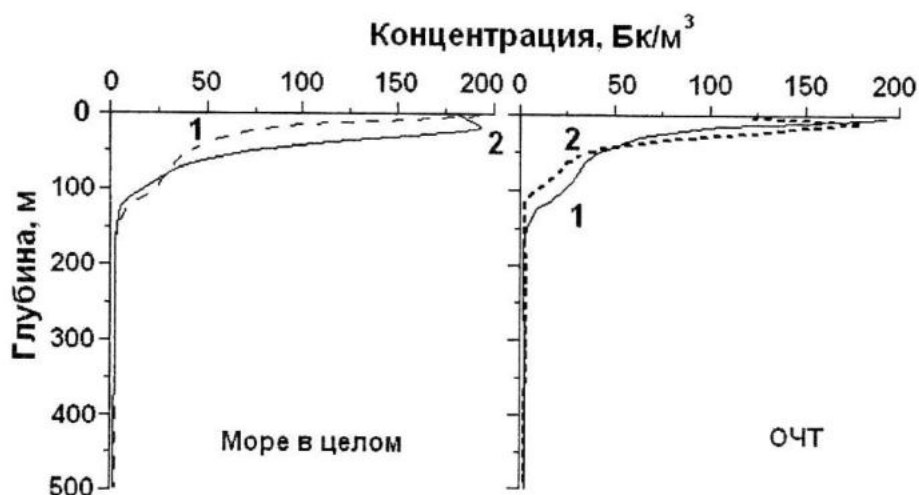
Во втором эксперименте зоны наибольших отличий в восточной части моря уменьшаются. Максимальные значения отношения $C_{\text{расч}}/C_{\text{изм}}$ не превышает 3. Таким образом, можно сказать, что приближение Филандера-Покановски при параметризации вертикального турбу-

лентного обмена позволяет улучшить качество получаемых численных результатов.

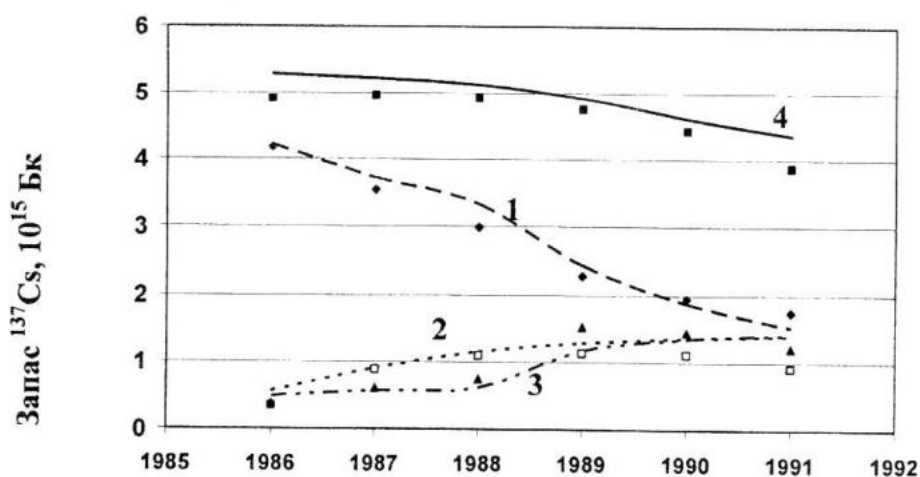
Запас ^{137}Cs в Черном море. По оценкам, приведенным в работе [13], суммарный запас ^{137}Cs в Черном море составлял в 1977 г. $(1,37 \pm 0,3) \cdot 10^{15}$ Бк. Кор-

ректировка этих данных на 1986 г. с учетом радиоактивного распада, обмена через Босфор и поступления из стратосферного резервуара продуктов ядерных взрывов дает величину запаса в Черном море $1,13 \cdot 10^{15}$ Бк. Таким образом, атмосферные выпадения в течение 1986 года в ~2,6 раза превысили дочернобыльский запас ^{137}Cs в Черном море.

Оценки послойного запаса ^{137}Cs выполнены на основе вертикальных профилей распределения радионуклида, полученных в экспедиционных исследованиях 1986 – 1994 гг., и данных второго численного эксперимента (рис. 6). Результаты оценок приведены на рис. 7.



Р и с. 6. Модельные вертикальные профили распределения концентрации ^{137}Cs , усредненные для всего моря и для зоны ОЧТ (1 – октябрь 1986 г.; 2 – май 1987 г.)



Р и с. 7. Распределение запаса ^{137}Cs в Черном море по слоям в 1986 – 1991 гг.: 1, \diamond – слой 0 – 100 м; 2, \square – слой 100 – 200 м; 3, \blacktriangle – слой 200 – 500 м; 4, \blacksquare – слой 0 – 500 м

Из результатов, приведенных на рис. 7, видно, что в течение первых двух лет после аварии перераспределение концентрации ^{137}Cs происходило только в верхнем 200 – метровом слое. Запас радионуклида в слое 200 – 500 м практически не изменялся. В последующие годы наблюдается увеличение запаса ^{137}Cs в

водах ниже 200 – метрового горизонта. Следует отметить, что к началу 1990 г. запас радиоактивного цезия в верхнем 100 – метровом слое уменьшился в 2 раза.

Заключение. Сопоставление оценок запаса ^{137}Cs в водах Черного моря по данным натурных наблюдений и чис-

ленного моделирования позволяет говорить о репрезентативности модели и возможности ее использования для прогноза радиоэкологического состояния Черного моря. Имеющиеся различия обусловлены, на наш взгляд, не столько неточностью модельных расчетов, сколько недостаточной обеспеченностью данными наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Staneva J.V., Buesseler K.O., Stanev E.V., Livingston H.D.* The application of radiotracers to a study of Black Sea Circulation: Validation of numerical simulation against observed weapons testing and Chernobyl ^{137}Cs data. // *J. Geophysical Res.* – 1999. – V. 104. – N C5. – P. 11,099 – 11,114.
2. *Демьшев С.Г., Еремеев В.Н., Чудиновских Т.В., Запезалов А.С.* Исследования различных сценариев радиоактивного загрязнения вод Черного моря на основе имитационного моделирования // *Морской экологический журнал.* – 2004. – Т. III, № 1. – С. 23 – 38.
3. *Egorov V.N., Polikarpov G.G., Kulebakina L.G., et al.* Modelling Large-scale Contamination of the Black Sea Caused by Long-lived Radionuclides of ^{137}Cs and ^{90}Sr Following the Chernobyl Accident // *Proc. of Seminar on Comparative Assessment of the Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accident: Kyshtym, Windscale, Chernobyl.* – Vol. 2.– Luxembourg: Report EUR 13574. – 1991. – P. 649 – 664.
4. *Buesseler K.O., Livingston H.D., Casso S.A.* Mixing between oxic and anoxic waters of the Black Sea as traced by Chernobyl cesium isotopes // *Deep-Sea Research.* – 1991. – V.38, Suppl. 2. – P. S725 – S745.
5. *Еремеев В.Н., Чудиновских Т.В., Исеева Е.А., Батраков Г.Ф.* Радиоэкологический мониторинг Черноморского бассейна. Банк данных и компьютерный атлас радиоактивности. / *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. научн. тр.* – Вып.3 (пam'яти Л.А. Ковешникова). – НАН Украины, МГИ, ОФ ИнБЮМ. – Севастополь, 2001. – С. 129 – 136.
6. *Никитин А.И., Мединец В.И., Чумичев В.Б. и др.* Радиоактивное загрязнение Черного моря вследствие аварии на Чернобыльской АЭС по состоянию на октябрь 1986 г. // *Атомная энергия.* – 1988. – Т. 65, вып. 2. – С. 134 – 137.
7. *Polikarpov G.G., Kulebakina L.G., Timoshchuk V.T., Stokozov N.A.* Sr-90 and Cs-137 in surface waters of the Dnieper River, the Black Sea and the Aegen Sea in 1987 and 1988 // *J. Environment Radioactivity.* – 1991. – V. 13. – P. 25 – 38.
8. *Гедеонов Л.И., Гритченко З.Г., Иванова Л.М. и др.* Радионуклиды стронция и цезия в воде низовья Дуная в 1985 – 1990 гг. // *Атомная энергия.* – 1993. – Т. 74, вып. 1. – С. 58 – 63.
9. *Buesseler K.O., Livingston H.D.* Time-series profiles of ^{134}Cs , ^{137}Cs and ^{90}Sr in the Black Sea // *Sensitivity to change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea / Eds. Ozsoy E., Mikaelyan A.* – Dordrecht (England): Kluwer Academic Publ. – 1997. – P. 239 – 251.
10. *Альтман Э.Н., Кумыш Н.И.* Многолетняя и внутригодовая изменчивость баланса пресных вод Черного моря // *Труды ГОИН.* – Л.: Гидрометеоздат. – 1986. – Вып. 176. – С. 3 – 18.
11. *Демьшев С.Г., Запезалов А.С., Кубряков А.И., Чудиновских Т.В.* Эволюция поля концентрации цезия-137 в Черном море после прохождения чернобыльского облака // *Метеорология и гидрология.* – 2001. – № 10. – С.49 – 61.
12. *Pacanowski R.C., Philander S.G.H.* Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // *J.Physical Oceanography.* – 1981. – № 7. – P. 1443 – 1451.
13. *Вакуловский С.М., Катрич И.Ю., Краснопецев Ю.В. и др.* Пространственное распределение и баланс ^3H и ^{137}Cs в Черном море в 1977 г. // *Атомная энергия.* – 1980. – Т. 49, № 2. – С. 105 – 108.