

ОЦЕНКА СОСТАВЛЯЮЩИХ БЮДЖЕТА ^{137}Cs В ЧЕРНОМ МОРЕ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Т.В. Чудиновских

Морской гидрофизический институт НАН
Украины

Г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail: chudtv@alpha.mhi.iuf.net

Приведены результаты оценок составляющих бюджета ^{137}Cs в Черном море для 1986 – 2004 гг. Расчеты выполнены на основе данных радиоэкологического мониторинга и имитационного моделирования эволюции полей радиоактивного цезия. Для задания начальных и граничных условий в модели использовались данные натурных наблюдений за содержанием ^{137}Cs в компонентах экосистемы Черноморского бассейна.

Введение. В последние два десятилетия в радиоэкологических исследованиях Мирового океана сформировалась четкая региональная направленность. Одним из объектов, привлекающих внимание ученых-океанологов и общественности, является Черное море. Причиной пристального внимания к этому региону Мирового океана явилась катастрофа на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г. В результате краткосрочных атмосферных выпадений содержание долгоживущих радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в верхнем перемешанном слое увеличилось в десятки раз [1], а суммарный поток на акваторию моря в четыре раза превысил уровень глобальных выпадений за предшествующие 35 лет [2]. Вторичное загрязнение черноморских вод в последующие периоды было обусловлено смывом радиоактивных продуктов с водосборных бассейнов рек и выносом их в море. Значительность влияния речного стока на уровень радиоактивного загрязнения Черного моря, особенно в его северо-западной части, определила актуальность проведения исследований в этом направлении.

На протяжении первых десяти лет после аварии на ЧАЭС в Черном море проводились регулярные радиоэкологические исследования, на основании которых был проведен анализ временной и пространст-

венной изменчивости полей радионуклидов [3-6].

Необходимость в оценке составляющих баланса радионуклидов в морском бассейне возникает и при использовании их в качестве трассеров различных гидродинамических процессов. Косвенные методы исследований процессов циркуляции водных масс получили в настоящее время широкое распространение [7 – 9]. Они основаны на анализе перемещений некоторой пассивной примеси – трассера, который переносится течениями и диффузией, но не оказывает влияния на эти процессы. Изотопные методы исследований являются не только удобным инструментом для качественной интерпретации и количественной оценки процессов обмена, но в ряде случаев позволяют уточнить представления о физическом механизме переноса вод и формировании потоков вещества в толще бассейна [10].

Для решения задачи распространения радиоактивного трассера в морском бассейне недостаточно знать только основные уравнения, описывающие процессы, в которые он вовлекается. Получение корректного решения возможно лишь при правильном задании начальных и граничных условий. В качестве начальных условий может быть использовано некоторое фиксированное в определенный момент времени поле концентрации радионуклида в изучаемом морском бассейне. Для Черного моря таким моментом целесообразно использовать распределение трассера перед выпадением радионуклидов чернобыльского происхождения. Согласно результатам исследований, приведенным в работе [11], распределение ^{137}Cs в поверхностных водах моря было достаточно однородным со средними значениями концентрации 18 Бк/м^3 .

Задание граничных 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. Достоверность проводимых оценок определяется двумя факторами – точностью оценок составляющих водного баланса Черного моря и достоверностью результатов радионуклидных исследований.

Материалы и методы. Оценки и расчеты выполнены на основе результатов радиоэкологического мониторинга Черномор-

ского бассейна, который проводился на научно-исследовательских судах МГИ НАНУ в 1986 – 1998 гг. [5]. Водный баланс Черного моря для 1986 – 2005 гг. посчитан по методике, разработанной в бывшем СО ГОИНе (ныне МО УкрНИГМИ) [12]. Оценки послынного запаса радионуклидов выполнены с использованием численного моделирования переноса пассивной примеси в Черном море.

Водный баланс Черного моря. С изменением экологической обстановки в Черноморском регионе возрастают требования к оценке составляющих водного баланса бассейна и точности трактовки их тенденций. Оценками отдельных составляющих водного баланса занимались многие авторы. Как правило, их выводы достаточно противоречивы. В большинстве работ отсутствуют ссылки на период осреднения, не приводятся оценки внутригодового распределения [13]. Несмотря на ряд неточностей, методика расчета водного баланса, разработанная в МО УкрНИГМИ, представляется наиболее обоснованной и приемлемой на настоящий момент времени [12]. В данной работе расчет составляющих водного баланса Черного и Азовского морей был выполнен по указанной методике за период 1986-2005 гг., максимальные, минимальные значения и среднеквадратические отклонения также рассчитаны для этого периода. На рисунке 1 показана временная изменчивость водного баланса Черного моря для периода исследований*.

Составляющие бюджета радионуклидов. Уравнение баланса радионуклидов для Черного моря имеет вид:

$$\Delta q = q_F + q_R + q_{NB} + q_A - q_{HB} - q_K \quad (1)$$

где q_F – поступление радионуклидов из атмосферы; q_R – поступление с речными водами; q_{NB} – поступление с водами нижнебосфорского течения; q_A – поступление через Керченский пролив из Азовского моря; q_{HB} – сток через Босфор в Мраморное море; q_K – сток через Керченский пролив в Азовское море. Еще одним компонентом стока является, строго говоря, переход радионуклидов в донные отложения. Для глубоководной части моря донные отложения являю-

тся конечным “депо” радиоизотопов. Это объясняется тем, что основным поставщиком ^{137}Cs на дно является оседающая взвесь. Поскольку цезий имеет $K_n \gg 1$ [14], то его обратный переход в растворенное состояние ничтожно мал. Деминерализация радиоизотопа может играть существенную роль только в районах мелководного шельфа, донные отложения которого, во-первых, содержат значительно более высокие концентрации ^{137}Cs , а во-вторых, подвержены периодическому взмучиванию, в результате которого ускоряются процессы ионного обмена.

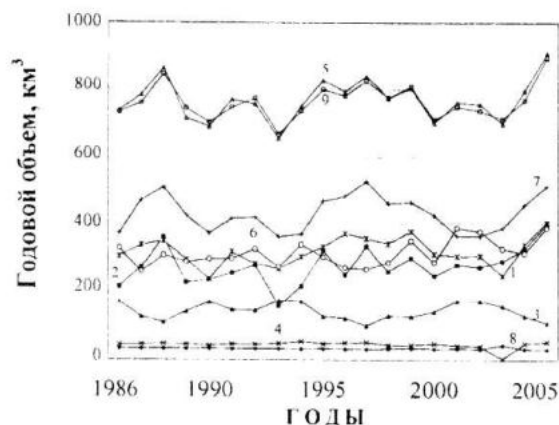


Рисунок 1 – Межгодовая изменчивость составляющих водного баланса Черного моря в период с 1986 по 2005 годы: 1 – сток рек; 2 – осадки; 3 – Нижнебосфорское течение; 4 – приток из Азовского моря; 5 – суммарный приток; 6 – испарение; 7 – Верхнебосфорское течение; 8 – поток в Азовское море; 9 – суммарный отток

Оценка потоков ^{137}Cs из атмосферы.

Авария на Чернобыльской атомной станции в 1986 г. привела к выбросу в атмосферу значительного количества радиоактивных материалов, в состав которых входили более 30 различных радионуклидов с периодами полураспада от нескольких дней (^{131}I , ^{132}Te) до десятков тысяч лет (^{239}Pu , ^{240}Pu). Количественные оценки выброса рассматриваемых долгоживущих радионуклидов составили 4% ^{90}Sr и 10-13% ^{137}Cs и ^{134}Cs от активности, накопленной в реакторе к моменту взрыва, что в абсолютном выражении составляет примерно $2,2 \cdot 10^{17}$ Бк ^{137}Cs , $\sim 1,05 \cdot 10^{17}$ Бк ^{134}Cs и $7,1 \cdot 10^{16}$ Бк ^{90}Sr [15].

*Расчет водного баланса Черного и Азовского морей выполнен сотрудниками Морского отделения УкрНИГМИ (г.Севастополь).

Поднятое на высоту более 20 км, радиоактивное облако стало источником поступления радионуклидов в приземный слой атмосферы практически всего северного полушария на протяжении длительного периода. По данным наблюдений, выполненных в МГИ НАНУ в 1986 – 1989 гг., концентрация ^{137}Cs в приземной атмосфере превышала дочернобыльский уровень на протяжении всего этого периода [16].

Поскольку прямые измерения плотности выпадения радионуклидов на акваторию моря не проводились, мы попытались оценить их косвенным методом. Для расчета потока использовались результаты измерений концентрации ^{137}Cs и плотности выпа-

дения суммы β -активных радионуклидов в приземном слое атмосферы. Результаты расчетов приведены на рисунке 2. Для аппроксимации выбрана степенная функция, уравнение которой записывается в виде:

$$P = 2122,5 \cdot \tau^{-1,67} \quad (2)$$

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

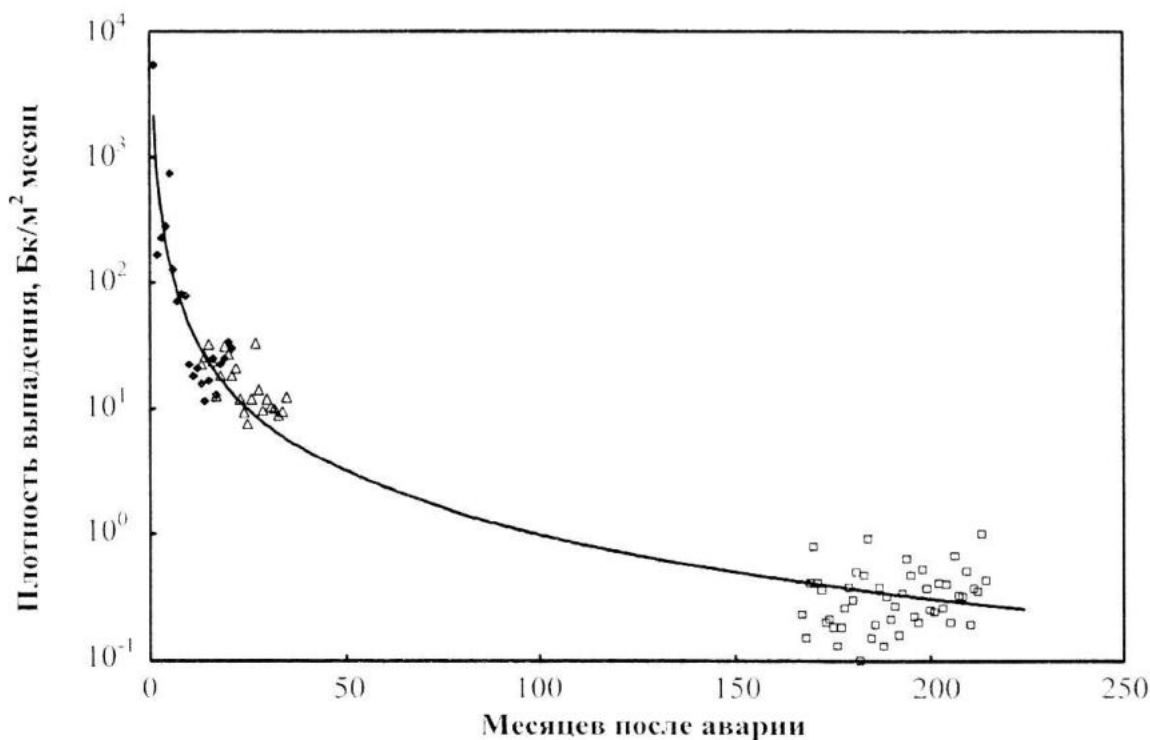


Рисунок 2 – Изменчивость плотности выпадения ^{137}Cs из атмосферы в Черноморском регионе:
 ◆ – рассчитаны по суммарной β -активности; Δ – рассчитаны по концентрации ^{137}Cs в приземном слое воздуха; \square – данные ЦГО Украины, осредненные для черноморских пунктов наблюдения

Полученные оценки и уравнение их аппроксимации (1) хорошо согласуются с данными наблюдений Центральной геофизической обсерватории Украины, приведенными на рисунке 2 (2002 – 2004 гг.).

Исходя из результатов, приведенных на рисунке 1, и учитывая распределение осадков над Черным морем в 1986 году поток ^{137}Cs на акваторию моря с атмосферными выпадениями оценивается величиной $2,91 \cdot 10^{15}$ Бк. В последующие два года сум-

марный поток радиоактивного цезия составил еще $1,95 \cdot 10^{14}$ Бк. Для оценки потока цезия в период с 1989 по 2005 гг. использовали уравнение (2). Суммарное количество радионуклида, поступившего на поверхность Черного моря за этот период составило $9,33 \cdot 10^{13}$ Бк.

Оценка выноса ^{137}Cs в Черное море с речным стоком. Вынос искусственных радионуклидов с речными водами является вторым по величине после атмосферных

выпадениям источником их поступления в Черное море. В речные воды радионуклиды поступают в результате сброса загрязненных промышленных вод, прямых атмосферных выпадений и смыва атмосферными осадками с поверхности водосборных бассейнов (ВСБ). При этом определяющим является последний фактор. Количество радионуклидов, смытых с ВСБ рек и выносимых в море с речными водами зависит как от плотности загрязнения ВСБ, так и от объема речного стока.

Суммарный речной сток Q_2 по естественному районированию складывается из стока рек северо-западной части Черного моря, стока рек Крыма, стока рек Кавказа, речного стока Турции и стока рек болгаро-

румынского бассейна. Общая площадь водосбора принималась равной $2.5 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ [12]. Из них на северо-западную часть моря приходится около 80%.

Анализ результатов исследований загрязнения вод Дуная радиоактивным цезием приведен на рисунке 3. Такой же анализ выполнен и для Днепра. Для периода 1991 – 2005 гг. оценки выноса радионуклидов с речными водами (сплошная линия 2) были проведены по коэффициентам стока с водосборных площадей, которые рассчитывали по уравнению, приведенному в работе [17]. Содержание радионуклидов в почвах бассейнов водосбора Дуная и Днепра оценивали по результатам измерений, приведенным в работе [18].

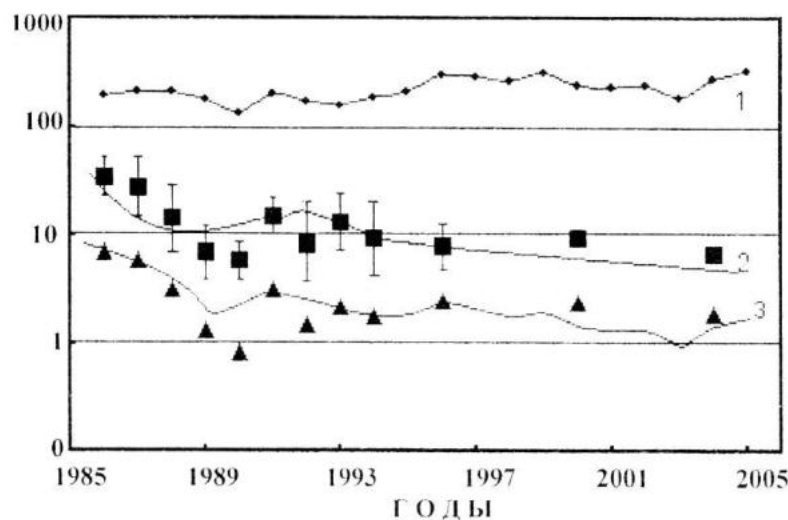


Рисунок 3 – Изменчивость значений годового стока (км^3) Дуная (1), концентрации ^{137}Cs ($\text{Бк}/\text{м}^3$) в речной воде (2) и суммарного за год выноса (10^{12} Бк) ^{137}Cs (3)

Временные ряды 1991 – 2005 гг., характеризующие изменение плотности загрязнения почв ^{137}Cs за этот период, были получены на основе зависимости, приведенной в работе [19], которая отражает уменьшение концентрации радионуклидов в почве после максимума, наблюдавшегося в 1986 г. Согласно выполненным оценкам за весь рассматриваемый период с водами Дуная было вынесено $47,86 \cdot 10^{12}$ Бк. В работе [4] вынос ^{137}Cs за период 1986 – 1990 гг. оценивается величиной 14 ТБк.

Вынос ^{137}Cs с днепровскими водами в Черное море оказался в 20 раз меньше, чем Дуная.

Запас ^{137}Cs в Черном море. По оценкам, приведенным в работах [11, 20], суммарный запас ^{137}Cs в Черном море составлял в 1977 г. $(1,37 \pm 0,3) \cdot 10^{15}$ Бк. Корректировка этих данных на 1986 год с учетом радиоактивного распада, обмена через Босфор [21] и поступления из стратосферного резервуара продуктов ядерных взрывов [16] 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 послонного запаса ^{137}Cs выполнены на основе вертикальных профилей распределения концентрации радионукли-

да, полученных в экспедиционных исследованиях 1986 – 1994 гг., и численного эксперимента эволюции поля концентрации. На рисунке 4 приведены результаты модельных расчетов и сравнение их с данными наблюдений (б). Экспериментальные и модельные результаты относятся к одному моменту времени – 11 августа 1987 г. и одной точке – 42° 48' с.ш., 30° 00' в.д., вертикальный разрез проходит по этой же широте (а).

Подробно комплексная модель гидрофизических полей и поля концентрации ^{137}Cs в Черном море описана в работе [22]. Отличительными особенностями данного

численного эксперимента являются следующие: бассейн моря разбит на боксы с горизонтальными размерами 5,0 x 5,0 км. По вертикали расчет проводился на 45 горизонтах, шаг по времени равнялся 5 мин. В качестве начальных условий было задано распределение ^{137}Cs , полученное в июне 1986 г.

Граничные условия – поток радионуклида из атмосферы задавали, используя приведенные выше аппроксимации. Вынос с водами Днепра и Дуная задавался по среднегодовой концентрации изотопа в речной воде.

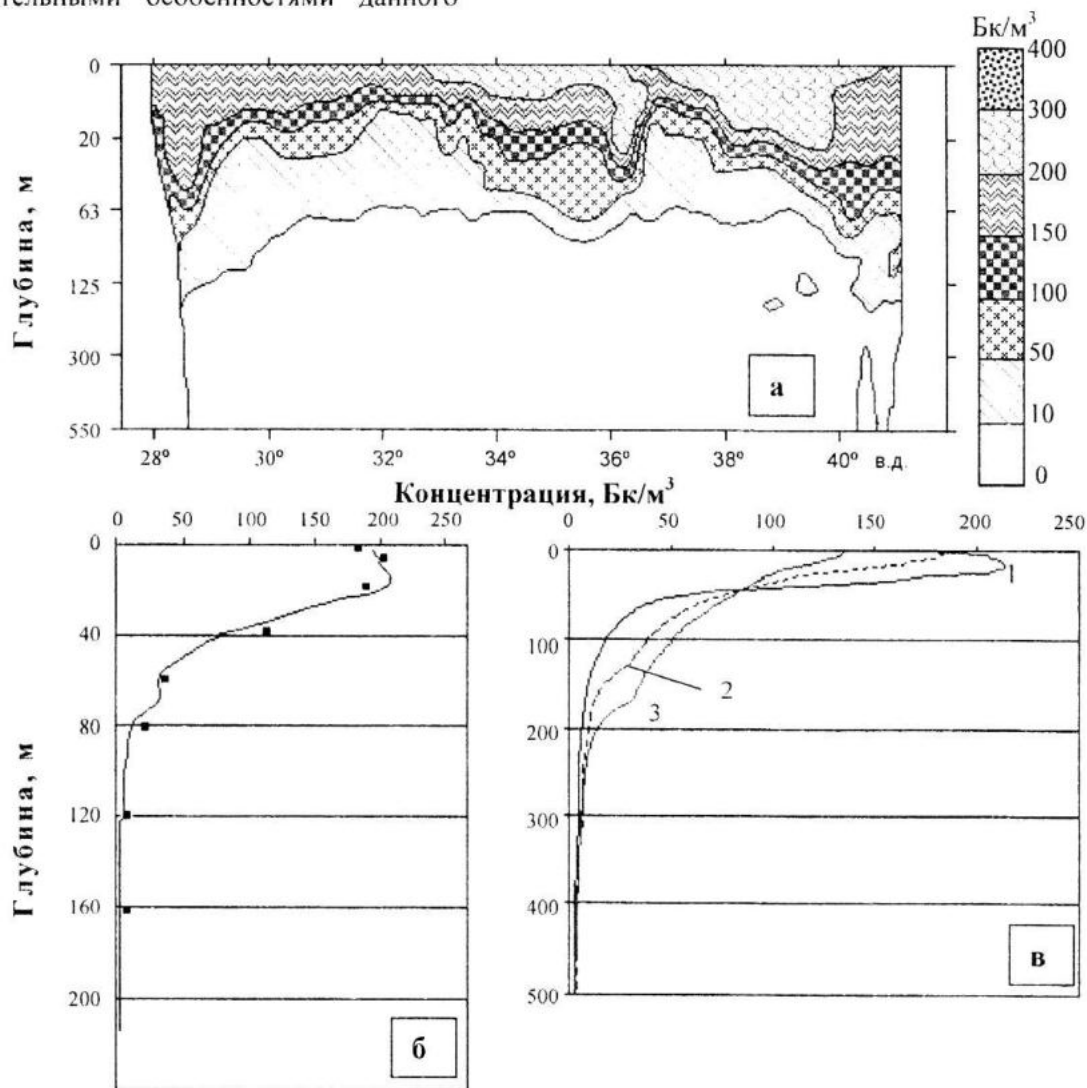


Рисунок 4 – Вертикальное распределение ^{137}Cs в водах Черного моря в августе 1987 г.: а – разрез по 42° 48' с.ш. (а); б – распределение концентрации по глубине в точке с координатами 42° 48' с.ш., 36° 00' в.д. (■ – измеренные, сплошная линия – модельные); в – осредненные для всего моря модельные вертикальные профили концентрации (1 – 1986 г., 2 – 1987 г., 3 – 1988 г.)

В таблице приведены результаты оценок послойного запаса радиоактивного це-

зия в водах Черного моря. Оценки выполнены по результатам натуральных измерений

в поверхностном слое моря, вертикального распределения ^{137}Cs и на основе численного

моделирования эволюции полей концентрации радиоизотопа.

Таблица 1 – Оценка запаса ^{137}Cs в водах Черного моря по данным натурных наблюдений и численного моделирования (приведены в скобках), 10^{15} Бк

| Год | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1998 |
|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|------|------|------|
| Слой, м | | | | | | | | | | | |
| 0 – 50 | 3,88 (3,64) | 2,03 (2,76) | 1,65 (2,18) | 1,30 (1,26) | 1,21 (1,08) | 0,99 (0,84) | 0,76 | 0,65 | 0,46 | 0,52 | 0,52 |
| 50 – 100 | 0,30 (0,58) | 1,51 (0,97) | 1,34 (1,15) | 0,98 (1,18) | 0,74 (0,80) | 0,76 (0,69) | 0,60 | 0,58 | 0,49 | 0,40 | |
| 100 – 150 | 0,20 (0,27) | 0,45 (0,51) | 0,55 (0,68) | 0,57 (0,68) | 0,56 (0,63) | 0,46 (0,62) | 0,44 | 0,37 | 0,22 | 0,23 | |
| 150 – 200 | 0,15 (0,30) | 0,45 (0,40) | 0,55 (0,48) | 0,57 (0,62) | 0,56 (0,74) | 0,46 (0,79) | 0,44 | 0,37 | 0,22 | 0,23 | |
| 200 – 500 | 0,38 (0,49) | 0,62 (0,58) | 0,76 (0,63) | 1,53 (1,18) | 1,46 (1,36) | – (1,43) | 0,84 | 0,56 | 0,35 | 0,49 | |
| Всего в слое 0 – 500 м | 4,91 (5,28) | 4,96 (5,22) | 4,92 (5,12) | 4,75 (4,92) | 4,44 (4,61) | – (4,37) | 3,05 | 2,45 | 1,68 | 1,81 | |

Сопоставление и анализ выполненных оценок позволяет констатировать, что на временном интервале интегрирования до 4 лет используемая модель дает результаты, совпадающие с реальными. Имеющиеся различия обусловлены не столько неточностью модельных расчетов, сколько недостаточной обеспеченностью данными наблюдений.

Заключение. Используя архивные результаты наблюдений за радиоактивностью приземного слоя атмосферы и распределения осадков в Черноморском регионе, рассчитана плотность выпадения ^{137}Cs на период с 1 мая 1986 года по март 1989 г. Получена зависимость, с достаточной точностью описывающая временной ход выпадений радиоактивного цезия. Проведены оценки потоков ^{137}Cs на акваторию Черного моря. Показано, что в 1986 году на поверхность Черного моря с атмосферными выпадениями поступило $2,91 \cdot 10^{15}$ Бк ^{137}Cs . В последующие два года суммарный поток радиоактивного цезия составил еще $1,95 \cdot 10^{14}$ Бк.

По литературным данным проведены оценки выноса ^{137}Cs с водами Дуная и Днепра. Полученные результаты использовались при задании краевых условий в модельных расчетах.

Проведены послойные оценки запаса ^{137}Cs в водах Черного моря. Показано, что запас радиоизотопа в слое 0 – 500 м по порядку величины совпадает с оценками его поступления после аварии на ЧАЭС.

Сопоставление результатов натурных наблюдений и модельных расчетов позволяет говорить о репрезентативности модели и возможности ее использования для прогноза радиозоологического состояния Черного моря.

Литература

1. Artificial radioactivity of the Black Sea /Eremeev V.N., Chudinovskikh T.V., Batrakov G.F. – UNESCO reports in marine science. 59. – Paris: UNESCO, 1993. – 95 p.
2. 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.
3. 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 Aegean Sea in 1987 and 1988 // J. Environment Radioactivity. – 1991. – V. 13. – P. 25 – 38.
4. 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.
5. Еремеев В.Н., Чудиновских Т.В., Исаева Е.А., Батраков Г.Ф. Радиозоологический 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 (памяти Л.А. Ковешникова). – НАН Украины, МГИ, ОФ ИнБЮМ. – Севастополь, 2001. – С.129 – 136.
6. 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.
7. 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. – V. 104. – N C5. – P. 11,099 – 11,114.
8. Демьшев С.Г., Еремеев В.Н., Чудиновских Т.В., Запечалов А.С. Исследования различных сценариев радиоактивного загрязнения вод Черного моря на основе имитационного моделирования // Морской экологический журнал. – 2004. – Т. III, № 1. – С. 23 – 38.
9. 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.
10. 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.
11. Вакуловский С.М., Катрич И.Ю., Краснопевцев 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.
12. Альтман Э.Н., Кумыш Н.И. Многолетняя и внутригодовая изменчивость баланса пресных вод Черного моря // Труды ГОИН. – Л.: Гидрометеиздат. – 1986. – Вып. 176. – С. 3 – 18.
13. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А.И. Симонова, Э.Н. Альтмана. – С.-Пб: Гидрометеиздат, 1991. – 429 с.
14. Молисмология Черного моря / Поликарпов Г.Г., Миронов О.Г., Егоров В.Н. и др. – Киев: Наукова думка. – 1992. – 303 с.
15. Израэль Ю.А., Петров В.Н., Авдюшин С.И. Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской атомной электростанции // Метеорология и гидрология. – 1987. – № 2. – С. 5 – 18.
16. Чудиновских Т.В., Запечалов А.С.. Оценка поступления долгоживущих антропогенных радионуклидов из атмосферы на поверхность Черного моря // МГЖ. – 2001. – N3. – С. 34 – 40.
17. Ветров В.А., Алексеенко В.А. Вынос чернобыльских радионуклидов с речных водосборов // Метеорология и гидрология. – 1992. – № 7. – С. 65 – 74.
18. Атлас загрязнения Европы цезием после аварии на Чернобыльской атомной станции: Международное научное сотрудничество по последствиям Чернобыльской аварии (1991-1995). Заключительный отчет EUR 16542 EN. – Люксембург: Офис по официальным публикациям Европейской Комиссии. – 1996. – 178 с.
19. Бакунин Н.А. Оценка выноса ^{90}Sr из почвенного покрова с речным стоком // Водные ресурсы. – 1999 – Т. 26, № 2. – С. 198 – 201.
20. Вакуловский С.М., Краснопевцев Ю.В., Никитин А.И., Чумичев В.Б. Распределение цезия-137 и стронция-90 между водой и донными отложениями в Черном море в 1977 году // Океанология. – 1982. – Т. 22, Вып. 6. – С. 712 – 715.
21. Батраков Г.Ф., Еремеев В.Н., Лукашин И.Ф., Чудиновских Т.В. Искусственная радиоактивность вод Средиземного моря // Доповіді Національної Академії Наук України. – 2000. – № 11. – С. 169 – 172.
22. Демьшев С.Г., Запечалов А.С., Кубряков А.И., Чудиновских Т.В. Эволюция поля концент
23. рации цезия-137 в Черном море после прохождения чернобыльского облака // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 10. – С.49 – 61.