

Т.В.Чудиновских, О.А.Дымова

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

**ИЗУЧЕНИЕ РОЛИ ПРОЦЕССОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОБМЕНА
В МНОГОЛЕТНЕЙ ЭВОЛЮЦИИ ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ^{137}Cs
В ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ**

На основе результатов радиоэкологического мониторинга и численного моделирования эволюции полей концентрации ^{137}Cs в Черном море показано, что распространение черноморского цезия до верхней границы постоянного пикноклина происходило в течение трех лет. Скорость заглубления нижней границы градиентного слоя концентрации составляла около 10 м/год в центральной части моря, 25 – 28 м/год в зоне ОЧТ и 35 – 40 м/год в районе восточного континентального склона. Как в центральной части моря, так и в зоне ОЧТ положение градиентного слоя в вертикальном распределении концентрации ^{137}Cs соответствует верхней высоко стратифицированной части постоянного пикноклина между горизонтами летнего и зимнего положения максимального вертикального градиента солёности.

Ключевые слова: *радиоактивный цезий, вертикальный обмен, моделирование, Черное море.*

Вертикальный перенос любой субстанции в океане (кинетической энергии, растворенных веществ, взвешенных частиц и др.) обусловлен турбулентной диффузией и вертикальной составляющей средней скорости. Влияние процессов вертикального переноса на пространственное распространение в морском бассейне техногенных радионуклидов удобнее всего проследить на примере изотопов, которые существуют в морской воде практически полностью в растворенном состоянии, имеют достаточно высокий выход при делении и сравнительно большой период полураспада. Наиболее приемлемыми с этой точки зрения следует признать ^{90}Sr и ^{137}Cs . Распространение этих изотопов в водной толще происходит преимущественно в результате движения и перемешивания воды, тогда как в переносе большинства других радиоизотопов (например, ^{144}Ce , ^{95}Zr – ^{95}Nb , ^{106}Ru – ^{106}Rh и др.) седиментационные и биологические процессы играют заметную роль.

Авария на Чернобыльской АЭС создала все условия для проведения исследований, превратив Черное море в практически идеальный полигон. Основную долю в радиоактивных выпадениях составляли радионуклиды цезия – ^{137}Cs и ^{134}Cs . При этом соотношение изотопов в период наиболее интенсивных выпадений оставалось практически постоянным – $0,53 \pm 0,01$. По нашим оценкам, выполненным на основе результатов наблюдений, на акваторию Черного моря в 1986 году поток ^{137}Cs 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 [1].

Целью исследований являлась оценка скорости распространения ^{137}Cs в глубинные воды Черного моря и изучение влияния гидродинамических процессов на эволюцию полей концентрации радиоизотопа.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи: анализ вертикальных профилей распределения ^{137}Cs в период с 1986 по 1995 гг.; численное моделирование эволюции поля концентрации ^{137}Cs в Черном море; валидация численной модели межгодовых изменений вертикального распределения радионуклидов путем сопоставления результатов расчетов и данных наблюдений; получение численных оценок скорости вертикального распространения ^{137}Cs для центральной части Черного моря, зоны Основного черноморского течения и континентальных склонов.

Материалы и методы. Оценки и расчеты выполнены на основе результатов радиоэкологического мониторинга Черноморского бассейна, который проводился на научно-исследовательских судах Морского гидрофизического института НАНУ, Института биологии южных морей НАНУ, НПО «Тайфун» (г.Обнинск), Морского отделения УкрНИГМИ и *Woods Hole Oceanographic Institute* (США) в 1986 – 1998 гг. [2 – 7]. Оценки скорости вертикального перемещения ^{137}Cs 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 [8]. В задаче предполагается, что радиоактивные вещества являются пассивной примесью, не влияющей на гидродинамические характеристики. Поэтому распространение радионуклидов в водной среде описывается 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 только 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 (2).

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 $z = H(x, y)$:

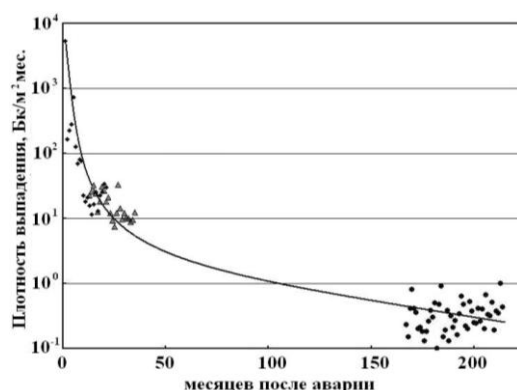
$$C_z = 0. \quad (4)$$

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:

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



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.

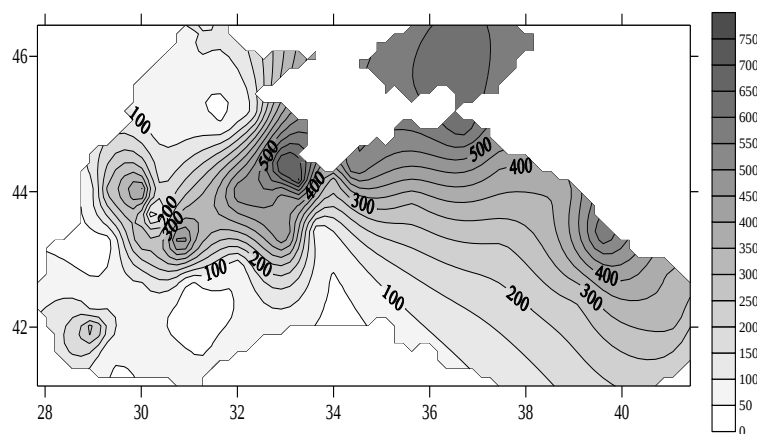
Поток ^{137}Cs на всю акваторию Черного моря. Поскольку прямые измерения плотности выпадения радиоизотопов на акваторию моря не проводились, то при задании потока из атмосферы были использованы результаты измерений концентрации ^{137}Cs и плотности выпадения суммы β -активных радиоизотопов в приземном слое атмосферы. Оценки временной изменчивости потока радиоактивного цезия на акваторию Черного моря приведены на рис.1. Для аппроксимации выбрана степенная функция, уравнение которой записывается в виде:

$$C_{atm}(t) = 21225 \cdot t^{-1,67}, \quad (7)$$

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

Начальное поле концентрации ^{137}Cs представлено на рис.2. Для его построения использован массив, сформированный из данных съемок, выполненных в июне 1986 г. [2 – 4, 7].

При проведении расчетов использовались климатические поля термогидродинамических характеристик. Расчеты проводились на горизонтальной сетке 5×5 км. По вертикали использовались 45 горизонтов с глубинами 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 63; 75; 88; 100; 113; 125; 150; 175; 200; 250;



Р и с . 2 . Начальное поле концентрации ^{137}Cs .

далее через каждые 50 м до 600 м, затем через 100 м до 2000 м и 2050; 2075; 2085; 2095; 2100 м. Интегрирование проводилось с шагом по времени 5 мин. Коэффициенты горизонтальной турбулентной диффузии в уравнении (1): $A_H = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^4 \cdot \text{с}^{-1}$. При описании вертикального обмена использовалось приближение Филандера-Покановски [9]. Интегрирование уравнений модели было выполнено на три года. Получены поля концентрации ^{137}Cs на каждые сутки времени интегрирования для всех исследуемых горизонтов.

Валидация численной модели межгодовых изменений вертикального распределения радионуклидов проводилась путем сопоставления результатов расчетов и данных наблюдений (рис.3). Для этой цели использовали вертикальные профили концентрации, полученные при проведении наблюдений в октябре [4] и декабре 1986 г. и мае 1987 г. [3]. Модельные профили для каждой точки осреднялись за период проведения экспедиционных исследований.

Результаты, приведенные на рис.3, показывают, что модель с достаточной степенью адекватности отражает динамику вертикального переноса ^{137}Cs в Черном море на период интегрирования до трех лет. При более длительном интегрировании наблюдается все увеличивающееся расхождение результатов наблюдений и модельных расчетов.

Вертикальное распределение техногенных радионуклидов в Черном море после аварии на ЧАЭС. Для анализа вертикального распределения ^{137}Cs в период 1987 – 1994 гг. все вертикальные профили натурных наблюдений разделены на три группы: первая – для центральных частей циклонических круговоротов, вторая – для зоны Основного черноморского течения и третья – для континентальных склонов (рис.4). Общее количество анализируемых вертикальных профилей – 99. В каждой группе данные осреднялись для одного периода наблюдений.

Анализ вертикального распределения был ограничен слоем 0 – 500 м, т.к., во-первых, в глубинных слоях имеются лишь единичные определения (максимально на глубине 700 м), во-вторых, процесс перераспределения ^{137}Cs происходил в основном в этом слое моря. Полученные таким образом профили приведены на рис.5.

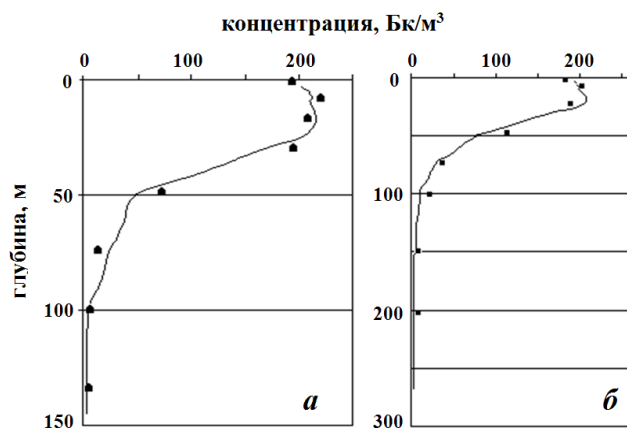
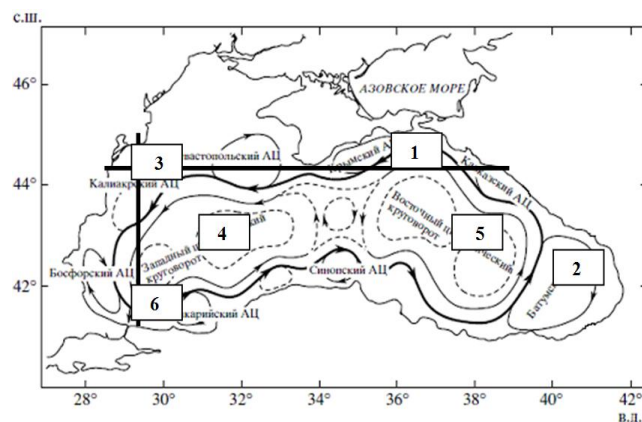
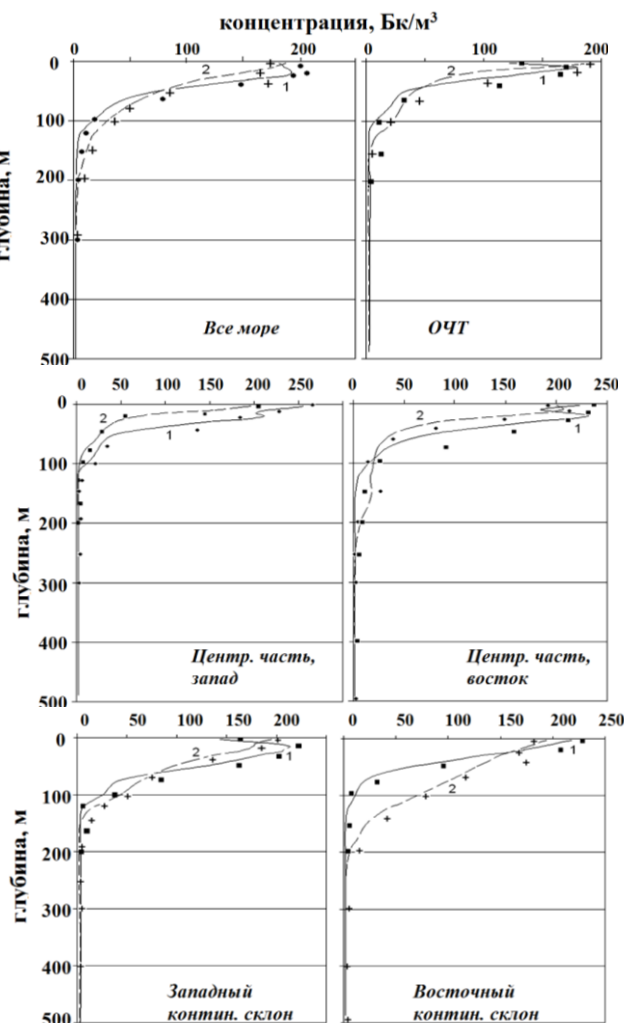


Рис. 3. Сопоставления результатов расчетов и данных наблюдений: декабрь 1986 г. (а); май 1987 г. (б).



Р и с . 4 . Расположение раз-
резов и районов осредне-
ния вертикальных профи-
лей распределения кон-
центрации ^{137}Cs : 1 – ОЧТ;
2 – восточный континен-
тальный склон; 3 – запад-
ный континентальный
склон; 4 – западная цен-
тральная часть; 5 – вост-
точная центральная часть;
6 – прибосфорский район

Анализ результатов натурных наблюдений, выполненных в 1986 г. [3, 4, 7], показал, что в течение летне-осеннего периода 1986 г. ^{137}Cs после выпадения на поверхность моря распространялся в верхнем квазиоднородном слое (ВКС) и сезонном термоклине. В течение зимы 1986 – 1987 гг. ^{137}Cs относительно равномерно распределился в ВКС, незначительные количества радионуклида отмечались в верхней части галоклина. В этот же временной промежуток было зафиксировано начало вертикального распространения ^{137}Cs в слое постоянного черноморского пикноклина. Результаты натурных определений и модельных расчетов, приведенных на рис.5, свидетельствуют о том, что в зоне Основного черноморского течения скорость проникновения ^{137}Cs в глубину существенно превышала этот параметр для центральных районов моря.



Р и с . 5 . Осредненные моде-
льные профили concentra-
ции радиоактивного цезия
для моря в целом и отдель-
ных его районов: (1 – ок-
тябрь 1986 г.; 2 – май 1987

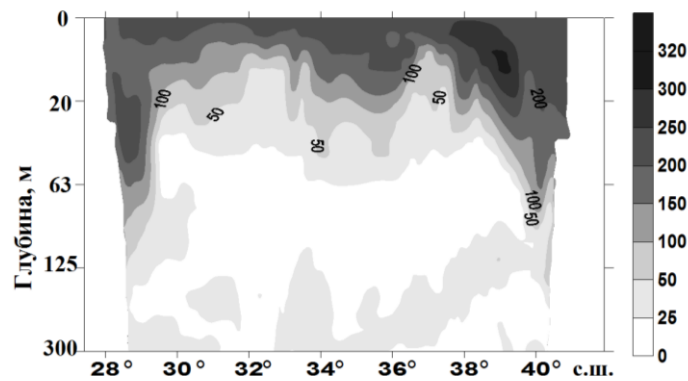
г.).

Максимальные вертикальные градиенты концентрации наблюдались в слое сезонного термоклина. Ежегодное зимнее заглубление нижней границы ВКС привело к образованию промежуточных максимумов на вертикальных профилях концентрации. Профили с промежуточными максимумами наиболее характерны для центральной части моря (рис.6).

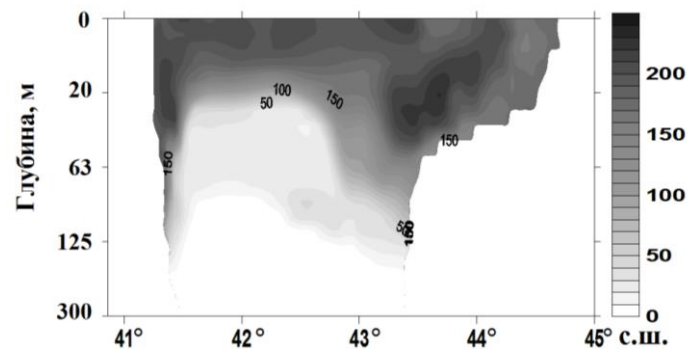
В течение 1986 – 1988 гг. ^{137}Cs распространился до глубины 50 – 70 м в центральной части моря и до 100 – 120 м в зоне ОЧТ (рис.7). Максимальная скорость распространения радиоизотопа наблюдалась в районе юго-восточного континентального склона, Севастопольского антициклона и в прибосфорском районе, где летом 1987 г. чернобыльский цезий распространился ниже 120 м.

Таким образом, распространение чернобыльского цезия до верхней границы постоянного пикноклина происходило в течение трех лет. Скорость заглубления нижней границы градиентного слоя концентрации составляла около 10 м/год в центральной части моря, 25 – 28 м/год в зоне ОЧТ и 35 – 40 м/год в районе восточного континентального склона.

Как в центральной части моря, так и в зоне ОЧТ положение градиентного слоя в вертикальном распределении концентрации ^{137}Cs соответствует верхней высоко стратифицированной части постоянного пикноклина между горизонтами летнего и зимнего положения максимального вертикального градиента солёности.



Р и с . 6 . Модельное распространение ^{137}Cs на разрезе по $43^{\circ}00'$ с.ш., май 1987 г.



Р и с . 7 . Модельное распространение ^{137}Cs на разрезе по $29^{\circ}15'$ в.д., мае 1987 г.

Заключение. Сопоставление результатов численного моделирования и натурных наблюдений позволяет говорить о репрезентативности модели. Достаточно хорошее совпадение наблюдаемых и модельных профилей концентрации радионуклида позволило оценить скорость вертикального переноса ^{137}Cs в отдельных районах моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чудиновских Т.В. Оценка составляющих бюджета ^{137}Cs в Черном море, выполненных на основе натурных наблюдений и численного моделирования // Системы контроля окружающей среды. Средства и информационные технологии.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009.– С.337-343.
2. 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 Res.– 1991.– v.38, Suppl. 2.– P.S725-S745.
3. Еремеев В.Н., Чудиновских Т.В., Исаева 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.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001.– вып.3 (памяти Л.А. Ковешникова).– С.129-136.
4. 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.
5. 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. Environ. Radioact.– 1991.– v.13.– P.25-38.
6. 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.
7. 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 by Ozsoy E., Mikaelyan A.– Dordrecht (England): Kluwer Academic Publ., 1997.– P.239-251.
8. 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.
9. Pacanowski R.C., Philander S.G.H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // J. Phys. Oceanogr.– 1981.– № 7.– P.1443-1451.

Материал поступил в редакцию 1.11.2010 г.