

НАТУРНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ЧЕРНОМ МОРЕ

Т.В. Чудиновских, Г.Ф. Батраков,
С. Г. Демышев, А.С. Запевалов

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
Г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: chudtv@alpha.mhi.iuf.net

Приведены результаты численного моделирования трансформации поля концентрации ^{137}Cs в Черном море и их сравнения с результатами натурных наблюдений. Результаты радиоэкологического мониторинга, проводимого в течение 10 лет после аварии на ЧАЭС, представлены в виде карт, которые составляют блок информации по искусственной радиоактивности Комплексного компьютерного атласа-справочника Азово-Черноморского бассейна.

Введение. Акватория Черного моря в начале мая 1986 г. оказалась в зоне южного следа радиоактивного облака, образовавшегося в результате взрыва на четвертом энергоблоке ЧАЭС 26 апреля 1986 и последующего выхода радиоактивных продуктов из разрушенной активной зоны реактора в процессе горения графита. После взрыва в окружающую среду было выброшено $1.48 \cdot 10^{18}$ Бк радиоактивности. Еще примерно столько же поступило со струйными выбросами в последующие десять суток [1].

Наиболее интенсивными исследования последствий аварии на ЧАЭС в Азово-Черноморском бассейне были в 1986-1991 г.г. Первые полномасштабные исследования, охватывающие всю акваторию Черного моря, были выполнены в период с 12 июня по 4 июля 1986 г. Исследования проводились четырьмя научными центрами – независимо друг от друга: Морским гидрофизическими институтом [2], Институтом биологии южных морей [3-4], г. Севастополь, Украина, Институтом экспериментальной метеорологии, г. Обнинск, Россия [5], и Вудсхольским океанографическим институтом, США [6]. В общей сложности было выполнено более 80 станций, покрывающих практически всю акваторию Черного моря. Полученная картина распределения достаточно полно от-

ражала уровень загрязнения черноморских вод.

В последующие десять лет регулярный радиоэкологический мониторинг черноморского бассейна проводился, в основном, тремя научными центрами - МГИ и ИнБЮМ НАНУ (г. Севастополь) и УкрНИГМИ (г. Киев) [3,5,7]. К настоящему времени выполнен большой объем наблюдений за загрязнением моря техногенными радионуклидами [2-7].

Однако далеко не всегда экспериментальные исследования позволяют оценить уровень экологической опасности того или иного инцидента. Можно отметить три основных причины, которые определяют недостаточность только натурных наблюдений:

- невозможность проведения измерений *in situ* в момент поступления загрязняющих веществ в море;
- высокая стоимость морских экспедиционных исследований;
- асинхронность получаемой информации.

Использование гидродинамических моделей позволяет частично преодолеть указанные недостатки. На основе численного анализа возможно также проведение имитационных экспериментов для различных сценариев техногенных катастроф.

Предлагаемая работа обобщает результаты натурных и модельных исследований радиоактивного загрязнения Черного моря, которые проводились в Морском гидрофизическем институте на протяжении нескольких лет.

Банк данных и компьютерный Атлас. Накопленные за период проведения радиоэкологического мониторинга данные натурных наблюдений позволяют проследить пространственную и временную изменчивость содержания радионуклидов в водах Черного моря. Вместе с тем, ретроспективный анализ поведения искусственных радиоизотопов в Черном море представляет непростую задачу. Причины этого кроются в недостаточном количестве наблюдений, обусловленном сложностью и трудоемкостью радиоэкологических исследований, неравномерности распределения станций по акватории бассейна и по времени, распределенности данных по разным организациям, значительной зависимости результатов измерений от методики отбора и анализа проб.

Все это привело к тому, что построенные ранее карты распределения концентрации радионуклидов не отражали в полной мере действительного радиоэкологического состояния Черного моря.

Для построения карт электронного Атласа искусственной радиоактивности вод Черного моря были собраны все доступные данные натурных наблюдений и реализована на персональном компьютере морская информационная технология исследования характеристик полей распределения радиоактивных изотопов. Под морской информационной технологией здесь понимается со-

вокупность используемых вычислительных средств и методов анализа и обработки данных, создание специализированных баз данных и построение электронных карт, на основе которых сформирован атлас. Карты экспериментальной версии Атласа искусственной радиоактивности вод Черного моря отражают распределение концентрации радионуклидов ^{137}Cs , ^{134}Cs и ^{90}Sr в поверхностных водах моря за весь период исследований (1986-1995 гг.). На рис. 1 приведена информация о пространственном и количественном распределении данных натурных наблюдений.

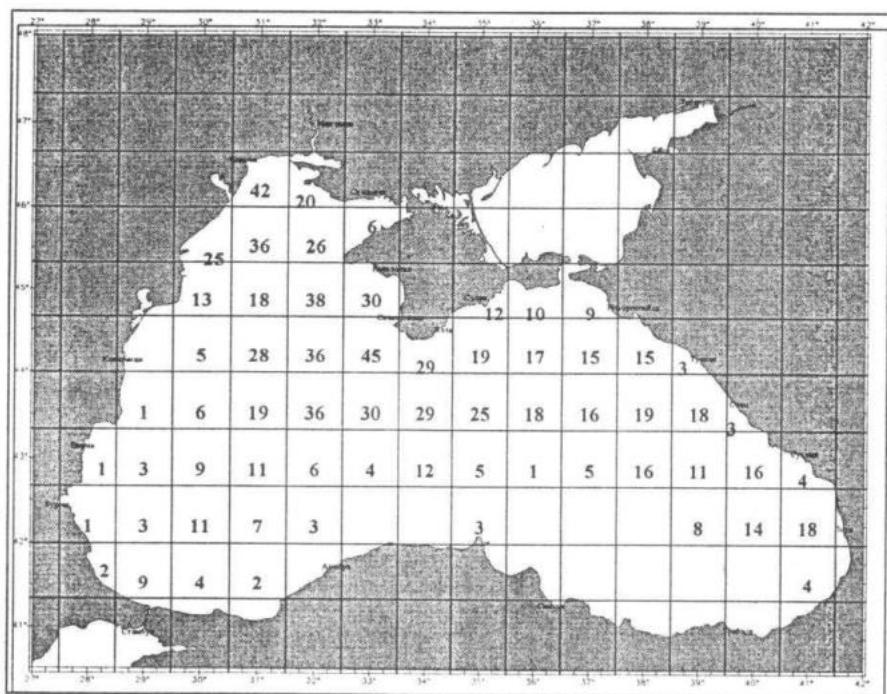
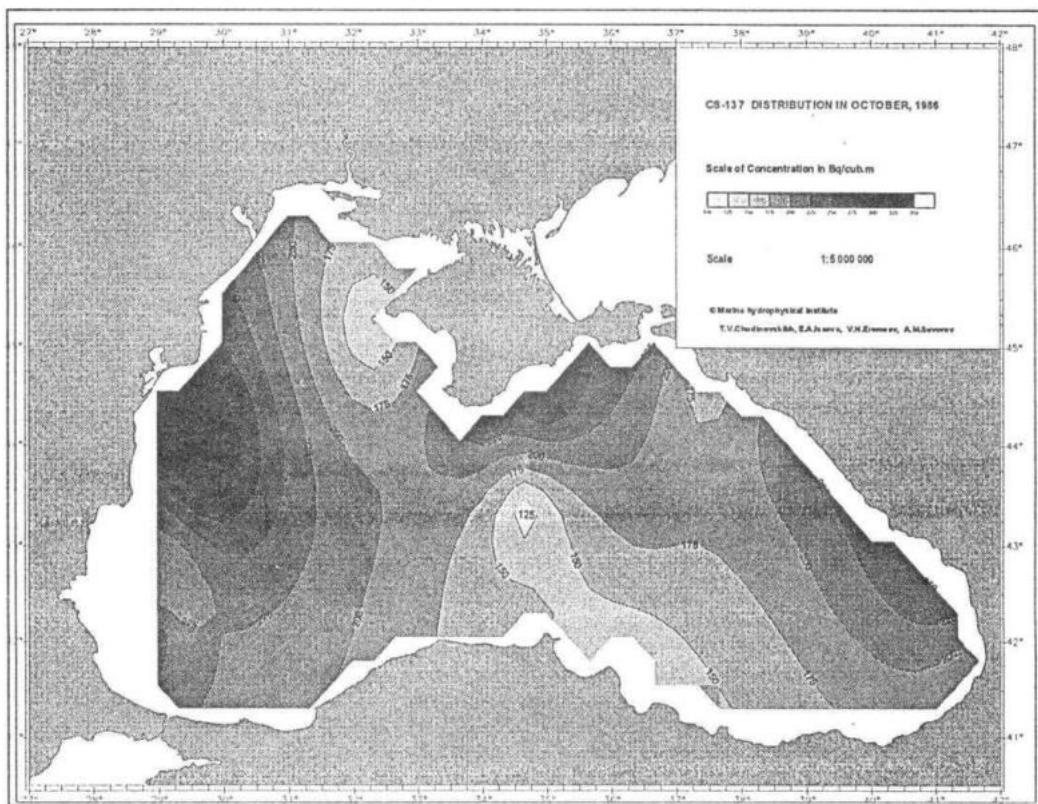


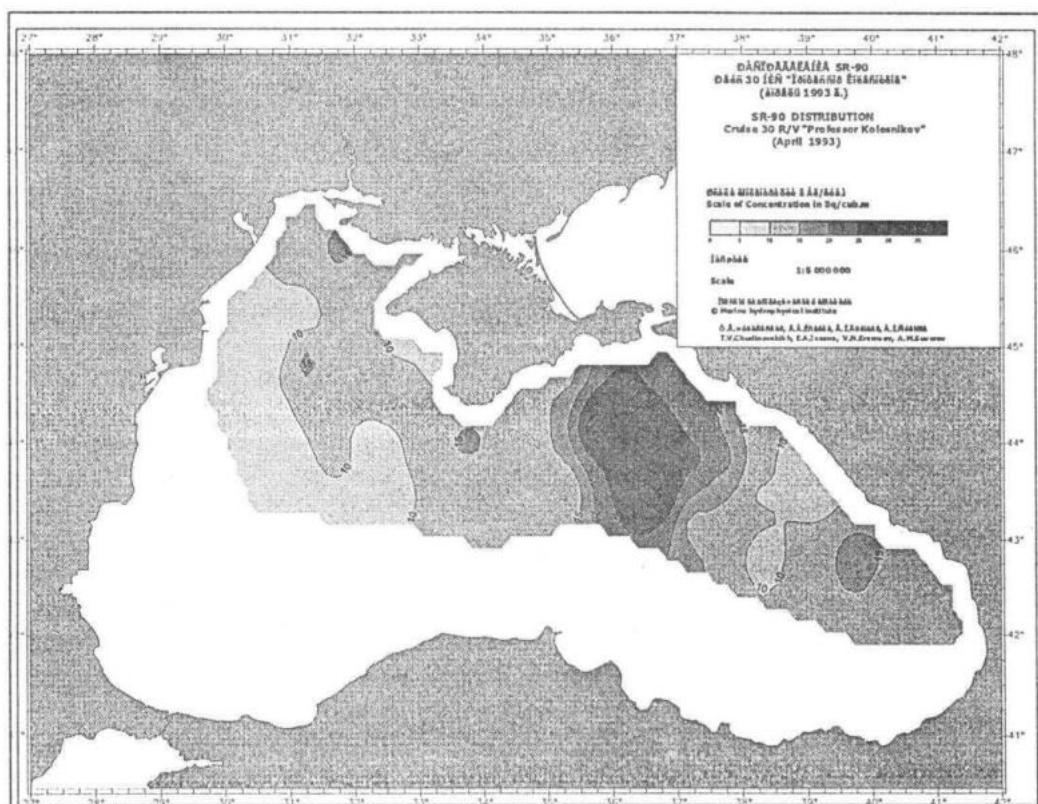
Рис. 1 - Количественное и пространственное распределение данных натурных наблюдений за содержанием ^{137}Cs по акватории Черного моря в период с 1986 по 1995 г.г.

При построении карт были объединены данные, полученные в разных экспедициях, но относящиеся к одному периоду времени. Карты распределения концентрации ^{137}Cs , ^{134}Cs и ^{90}Sr в поверхностном слое Черного моря строились с помощью пакета прикладных программ SURFER Gold Software на основании баз данных, файлы которых содержат информацию о координатах точки отбора пробы морской воды и значении концентрации изотопа в данной точке, выраженной в $\text{Бк}/\text{м}^3$. Интерполяция данных в узлы регулярной сетки проводилась методом Крегера. Шаг регулярной сетки состав-

ляет по ширине 0,125 градуса, по долготе – 0,15 градуса. Информация о восстановленных значениях содержится в соответствующих *grd-файлах, на основании которых строятся карты распределения концентрации радионуклида в поверхностном слое моря. При построении каждой карты шаг изолиний выбирается индивидуально в зависимости от диапазона изменения концентрации изотопа. На рис. 2 в качестве примера приведены карты распределения ^{137}Cs (а) и ^{90}Sr (б). Подобные карты построены и для распределения ^{134}Cs .



а



б

Рис. 2 - Карты распределения ^{137}Cs (октябрь 1986 г.) и ^{90}Sr (апрель 1993 г.) в поверхностных водах Черного моря, входящие в Атлас искусственной радиоактивности вод Черного моря

Численное моделирование процессов переноса радиоизотопов в Черном море.

Комплексная модель гидрофизических полей и поля концентрации ^{137}Cs . Уравнения модели. В общем виде транспорт радионуклидов в водной среде может быть описан следующим уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial Cu}{\partial x} + \frac{\partial Cv}{\partial y} + \frac{\partial Cw}{\partial z} = D + F \quad (1)$$

где C – концентрация исследуемого изотопа; u, v, w – компоненты поля скорости в прямоугольной системе координат $\mathbf{x} = (x, y, z)$, оси которой направлены соответственно на восток, север и вертикально вниз; D – турбулентная диффузия; F – член, описывающий источники поступления и стоки радионуклидов.

Рассмотрим слагаемое F в правой части (1), которое и определяет вид распределения изотопа. Внутри бассейна не существует источников радионуклидов, их поступление возможно только через его внешние границы. Уменьшение содержания радионуклидов может происходить за счет их естественного

распада, поглощения биотой, сорбции на взвеси и последующего оседания на дно.

Для ^{137}Cs , период полураспада которого равен 30 годам, уменьшение его содержания за счет распада за 365 суток составляет около 3%, что позволяет пренебречь этим эффектом при моделировании на временных интервалах менее 1 года.

Несмотря на достаточно высокие коэффициенты сорбции на взвешенном веществе и поглощения гидробионтами, эти два процесса не являются определяющими в балансе ^{137}Cs в морской среде, поскольку содержание как взвеси, так и гидробионтов в единице объема морской воды невелико. Измерения содержания ^{137}Cs на минеральной взвеси в глубоководной части моря показали, что на твердой фазе находится не более 1 % от общего количества радионуклидов. Немногим большие количества ^{137}Cs поглощаются фито- и зоопланктоном, которые составляют основную массу гидробионтов [8]. Таким образом, в уравнении (1) слагаемым F можно пренебречь.

Совместная система уравнений модели имеет вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \xi^z v + w \xi^y = -1/\rho_0 \frac{\partial(P+E)}{\partial x} + \nu_H \nabla^2 u + \nu_V \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \xi^z u - w \xi^x = -1/\rho_0 \frac{\partial(P+E)}{\partial y} + \nu_H \nabla^2 v + \nu_V \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = g\rho \quad (5)$$

$$dT/dt = \kappa_H \nabla^2 T + \partial(\kappa_V \partial T / \partial z) / \partial z \quad (6)$$

$$dS/dt = \kappa_H \nabla^2 S + \partial(\kappa_V \partial S / \partial z) / \partial z \quad (7)$$

$$\rho = \varphi(T, S) \quad (8)$$

$$dC/dt = \kappa^H \nabla^4 C + \kappa^V \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (9)$$

Система уравнений термогидродинамики моря (2) - (8) записана в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости жидкости, уравнения движения – в форме Лэмба.

Введены обозначения:

$\xi^z = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y + f$, $\xi^y = \partial u / \partial z$,
 $\xi^x = -\partial v / \partial z$, $E = \rho_0 (u^2 + v^2) / 2$; f – параметр; $\nu_V = 5 \text{ см}^2/\text{с}$, $\nu_H = 10^7 \text{ см}^2/\text{с}$ – коэффициенты турбулентной вязкости по вертикали и горизонтали;

$$\kappa_V = \begin{cases} 2.5 \text{ см}^2/\text{с}, & \text{при } z \leq 10 \text{ м} \\ 0.1 \text{ см}^2/\text{с}, & \text{при } z > 10 \text{ м} \end{cases}$$

$\kappa_H = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$, – коэффициенты турбулентной диффузии по вертикали и горизонтали в уравнениях переноса тепла, соли и $\kappa^y = \kappa_V$, $\kappa^H = -2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^2/\text{с}$, соответственно в уравнении эволюции изотопа ^{137}Cs . Остальные обозначения общеприняты.

Уравнение состояния принято в виде полинома второй степени от температуры и солености. В уравнении переноса (9) бигармонический оператор в правой части

использован из соображений его эффективности при подавлении мелкомасштабной компоненты движения.

Краевые и начальные условия. Границные условия:
на поверхности $z = 0$:

$$\nu_v \frac{\partial u}{\partial z} = -\tau^x, \quad \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} = -\tau^y, \quad w = 0,$$

$$\kappa_v \frac{\partial T}{\partial z} = Q,$$

$$\kappa_v \frac{\partial S}{\partial z} = (Pr - Ev) \cdot S_0, \quad (10)$$

на дне $z = H(x, y)$

$$u = v = w = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial S}{\partial z} = 0, \quad (11)$$

где τ^x, τ^y – касательные напряжения трения ветра; $Q(x, y, t)$ – поток тепла на границе «море-атмосфера»; $Pr(x, y, t)$ – осадки; $Ev(x, y, t)$ – испарение с поверхности моря.

На твердых боковых стенках:
для меридиональных

$$u = \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial S}{\partial x} = 0, \quad (12)$$

для зональных участков границы

$$v = \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial S}{\partial y} = 0. \quad (13)$$

На участках границы, где втекают реки и нижнебосфорское течение, поставим следующие условия:

для меридиональных

$$u = \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad T = T^P, \quad S = S^P; \quad (14a)$$

для зональных участков

$$v = \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad T = T^P, \quad S = S^P \quad (14b)$$

Для верхнебосфорского течения выполняются условия (12) – (13).

Рассмотрим задание краевых условий для концентрации ^{137}Cs . Проведенный анализ поступления радионуклидов в Черное море показал, что выносом ^{137}Cs со стоком рек можно пренебречь [7]. Еще один фактор, который необходимо рассмотреть, это водный обмен через Босфорский пролив. Известно, что данный обмен осуществляется

двумя потоками: верхний поток направлен из Черного моря, а нижний – из Мраморного моря. Результаты, приведенные в работе [9], показали, что содержание радионуклидов в мраморноморских водах на порядок ниже, чем в черноморских.

Согласно данным измерений, проводимых в г. Севастополь в период прохождения радиоактивного облака, среднесуточный уровень выпадений повысился на пять порядков по сравнению со средним дочернобильским. Максимум выпадений пришелся на 1–5 мая, после чего поступления из атмосферы начали быстро снижаться. Аналогичный характер выпадений был зафиксирован и на других прибрежных пунктах наблюдения системы Гидрометеослужбы. Подобный характер выпадений позволяет считать поступление ^{137}Cs мгновенным в начальный момент. По данным, полученным в мае-июне 1987 г., глубина проникновения чернобыльских радионуклидов не превышала 50–60 м и, следовательно, практически на всей акватории они не достигли дна [10].

Таким образом, краевые условия для концентрации C имеют вид:
на поверхности (для $t > t_0$) и на дне

$$\frac{\partial C}{\partial z} = 0; \quad (15)$$

на твердых участках боковой границы

$$\frac{\partial C}{\partial n} = \frac{\partial(\nabla^2 C)}{\partial n} = 0; \quad (16)$$

в устьях рек и в нижнебосфорском течении

$$C = \nabla^2 C = 0. \quad (17)$$

Для верхнебосфорского течения выполняются условия (15) – (16).

Рассмотрим постановку начальных условий для системы уравнений (2) – (8). Для того, чтобы проследить эволюцию радиоактивной примеси, необходимо иметь непрерывную по времени и пространству эволюцию вектора скорости в анализируемый период. Так как задача восстановления реальной картины течений в период с 1 мая 1986 по 1 мая 1987 года чрезвычайно сложна и пока не решена, то целесообразно на первом этапе использовать «климатические скорости». Под термином «климати-

ческие скорости» мы понимаем пространственно-временное поле скорости, полученное в результате решения прогностической задачи на установление с сезонно меняющимися краевыми полями в условиях (10), (14). Эта задача решена в работе [11]. Полученные на 1 мая гидрофизические поля принимались в качестве начальных условий для уравнений (2-3), (6-7). Таким образом, при $t = t_0$

$$U(x) = U^k(x), T(x) = T^k(x), S(x) = S^k(x). \quad (18)$$

Недостаток информации о радиоактивных выпадениях на акватории Черного моря в начале мая 1986 года не позволяет точно поставить начальной условие для уравнения переноса (9). Сформулируем его пока в общем виде:

$$C(x) = C^o(x) \quad (19)$$

Для конкретизации вида функции $C^o(x)$ была проведена серия специализированных численных экспериментов, о которых подробно будет сказано в следующем разделе работы.

Схема проведения экспериментов заключалась в интегрировании совместной системы уравнений (2) – (9) с краевыми (10) – (17) и начальными (18), (19) условиями. Период интегрирования варьировался в зависимости от целей эксперимента.

Параметры модели. Подробно дискретный аналог гидродинамического блока модели (2) – (8) описан в работах [12, 13].

Для аппроксимации уравнения переноса (9) были использована центрированная схема, аналогичная реализованной для разностных уравнений переноса – диффузии тепла и соли (6), (7) [13]. По смыслу задачи в качестве начального поля $C^o(x)$ будет задаваться функция, обладающая компактным носителем. Поэтому при дискретизации уравнения (9) указанным выше методом в решении присутствует вычислительный шум. Для его подавления и был использован бигармонический оператор, который эффективно сглаживает мелкомасштабную компоненту и незначительно искажает длинноволновую часть спектра [14].

Значение коэффициента было подобрано по результатам предварительных численных экспериментов.

Бассейн моря был разбит на боксы с горизонтальными размерами 14.8×14.8 км. По вертикали расчет проводится на 20 горизонтах: $z = (5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000\text{м})$. Шаг по времени равнялся 10 мин.

Восстановление первоначального местоположения пятна высокой концентрации ^{137}Cs . Анализ процессов распространения радионуклидов, попавших в Черное море после аварии на ЧАЭС, затруднен отсутствием информации о плотности выпадений на его акваторию. Основные атмосферные выпадения прошли 1-5 мая 1986 г., а первая крупномасштабная съемка была начата спустя примерно полтора месяца. За этот период первоначальное поле концентрации претерпело значительные изменения. Поэтому была предпринята попытка восстановления первоначального местоположения пятна, наблюдавшегося в июне 1986 г. к юго-западу от берегов Крыма, концентрация ^{137}Cs в котором почти в 5 раз превышала средние значения.

Для этой цели были использованы данные о загрязнении прибрежных регионов Черного моря [15], свидетельствующие о том, что наиболее высокий уровень загрязнения восточного побережья имел место в районе Северного Кавказа. При моделировании было принято, что в начальный момент радионуклиды равномерно распределены по вертикали в приповерхностном 5-ти метровом слое. Ниже этого слоя концентрация ^{137}Cs принималась равной нулю. В горизонтальной плоскости пятно задавалось в виде области, в центральной и прибрежной зоне которой концентрация составляла 100 условных единиц (100%) и понижалась к периферии. Результаты моделирования перемещения и трансформации пятна, а также данные выполненной в июне радиологической съемки приведены на рис. 3. Видно, что по прошествии 40 суток расчетное положение пятна достаточно хорошо воспроизводит его реальное местонахождение.

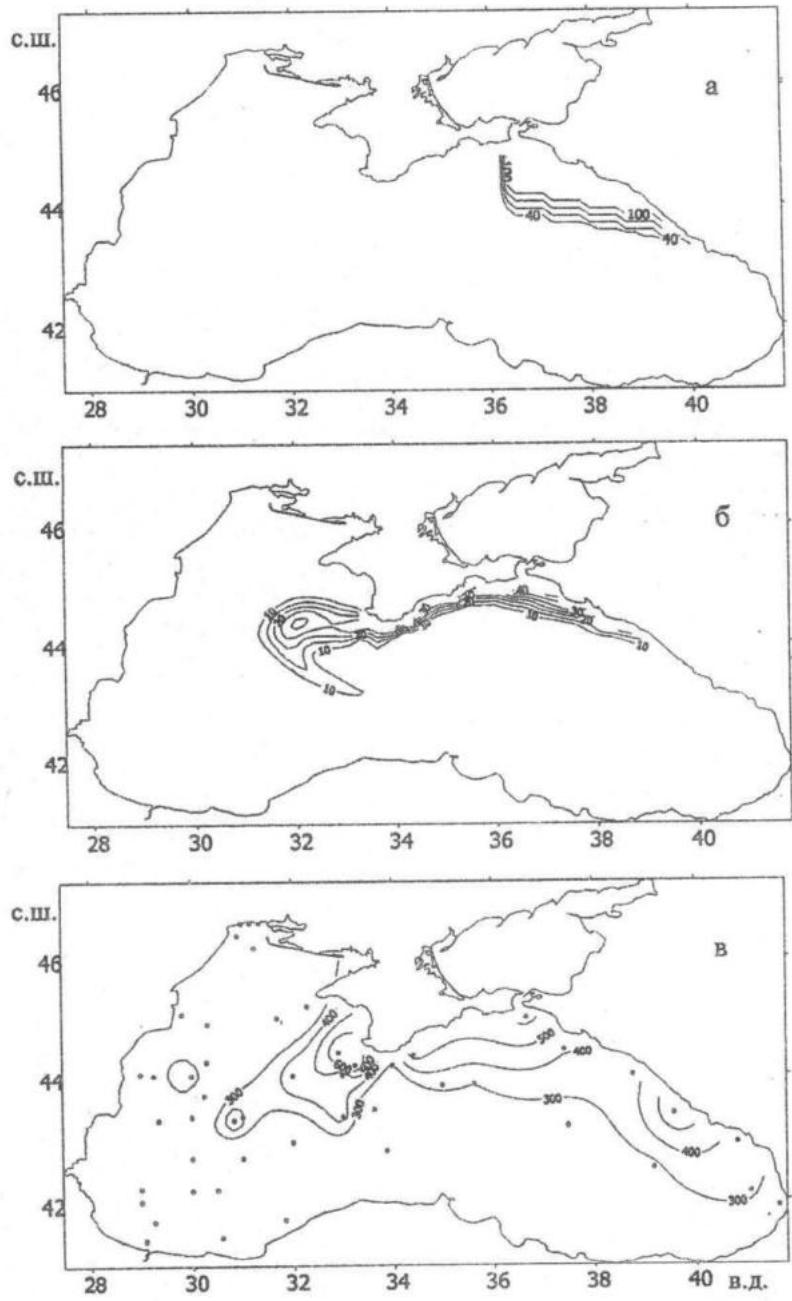


Рис. 3 – Сравнение результатов численного моделирования и данных натурных измерений: а – начальное положение и конфигурация пятна высокой концентрации цезия-137; б – положение и конфигурация пятна на 40 сутки модельного времени; в – пространственное распределение концентрации ^{137}Cs в поверхностном слое моря, по данным радиологической съемки, выполненной в июне 1986 г (концентрация [$\text{Бк}/\text{м}^3$]; точками показано расположение станций).

Результаты численного эксперимента по эволюции радиоактивного пятна в период с июня 1986 г по май 1987 г. Целью данного эксперимента было проведение анализа трансформации радиоактивного пятна, обнаруженного в ходе первой радиоизотопной съемки. В качестве начальных условий было принято поле концентрации ^{137}Cs , полученное в результате предыдущих расчетов (рис. 3б).

Согласно расчетам, по прошествии 60 суток (нулевой момент времени соответствует моменту возникновения пятна) область с максимальными значениями уровня концентрации ^{137}Cs продолжала находиться вблизи юго-западного побережья Крыма. Форма пятна трансформировалась, вытягиваясь в сторону болгарского побережья (рис. 4а). Вертикальное распределение характеризуется проникновением радионук-

лидов до горизонта 30 м, при этом максимум концентрации на этом горизонте смещен на юго-восток относительно максимума в поверхностном слое.

Можно отметить, что высокие значения концентрации ^{137}Cs вблизи юго-западного берега Крыма отмечаются еще в течение двух месяцев (рис. 4б, 3в).

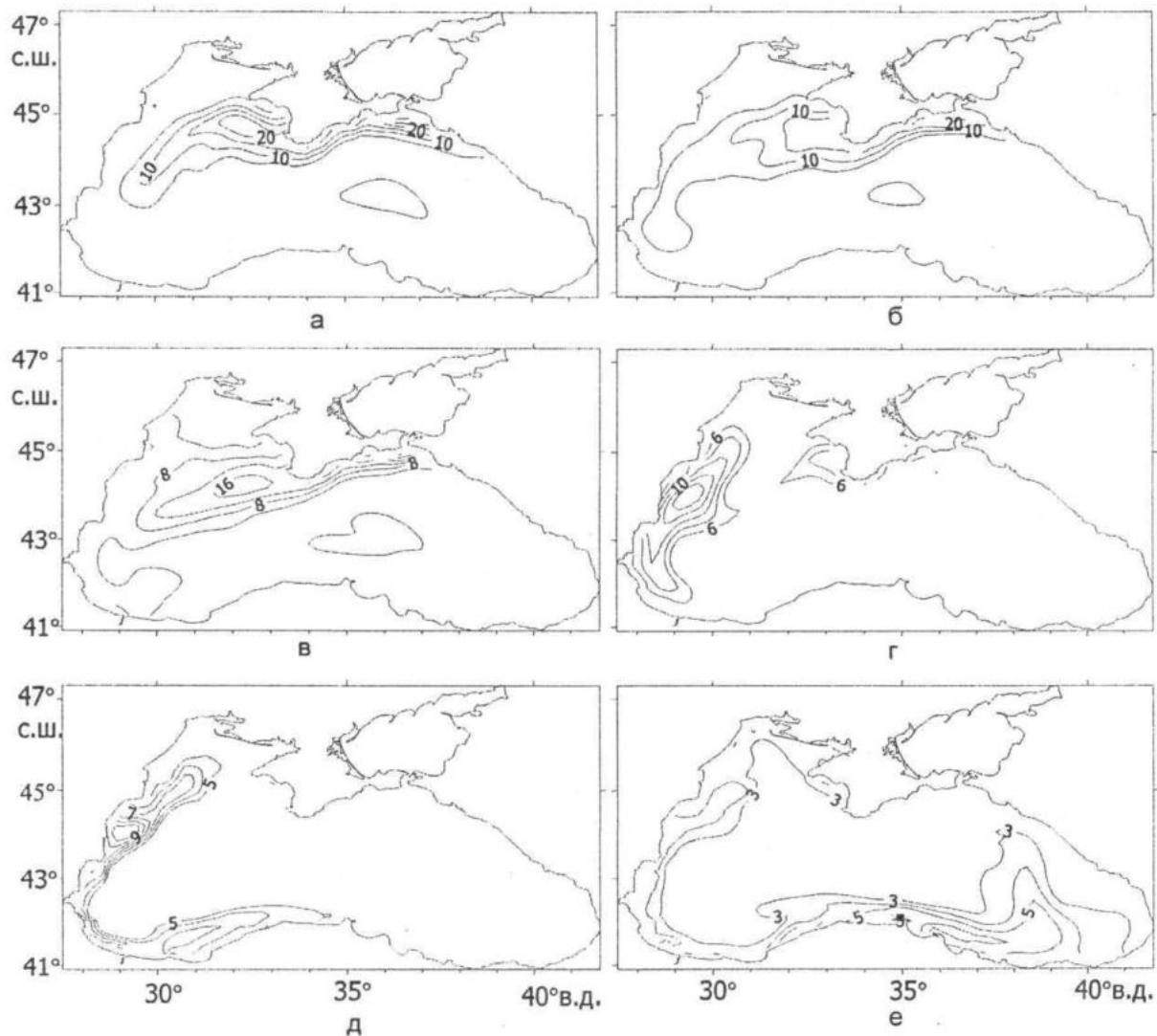


Рис. 4 - Эволюция пятна повышенной концентрации цезия-137 ($\text{Бк}/\text{м}^3$) после прохождения радиоактивного облака через 60 (а), 90 (б), 120 (в), 180 (г), 240 (д) и 300 суток (е)

Сравнивая результаты расчетов на 180 сутки с натурными измерениями, выполненными в октябре 1986 г. (рис. 2а и рис. 4г), можно говорить об их качественном совпадении. Как следует из рис. 2а, наиболее высокие значения концентрации ^{137}Cs в этот период были зафиксированы в западной части моря в районе 44° с.ш. При этом максимальное значение концентрации радионуклида понизилось в 2 раза по сравнению с величинами, полученными в июне. Результаты моделирования позволяют constатировать, что повышение содержания радионуклидов в западной части моря, на-

блюдаемое осенью 1986 г., было вызвано переносом более загрязненных вод из его северо-восточной части. Моделирование дальнейшей эволюции радиоактивного пятна показывает, что спустя 240 суток оно должно было достигнуть Прибосфорского района (рис. 4д). По данным наблюдений, выполненных в декабре 1986 г. [2], именно в этот период в указанном районе в поверхностном слое наблюдались наиболее высокие значения концентрации ^{137}Cs . В то же время, согласно модельным расчетам, уровень загрязнения прибрежных вод Болгарии оставался повышенным.

Глубина проникновения радионуклидов за период, прошедший после их поступления в поверхностный слой, не превышала 50 м. Область радиоактивного загрязнения вытянулась вдоль берега и начала проникать в северо-западную часть моря. По оценкам [10] к декабрю 1986 г. уровень концентрации в этом районе повысился почти в два раза.

Совпадение скоростей уменьшения содержания радиоизотопа в натурных наблюдениях и в модельных расчетах дает возможность оценить максимальный уровень загрязнения поверхностных вод Черного моря в результате Чернобыльской аварии. Согласно модельным оценкам, по прошествию 40 суток максимальное содержание радионуклида в верхнем 5-ти метровом слое составляло 40% от первоначального. По данным наблюдений, максимальные значения концентрации ^{137}Cs лежат в пределах от 720 Бк/м³ [10] до 840 Бк/м³ [4]. Отсюда следует, что первоначальные уровни концентрации радионуклида могли достигать значений 1800-2100 Бк/м³. Примерно такие уровни концентрации были зафиксированы в поверхностных водах Балтийского моря непосредственно после прохождения чернобыльского радиоактивного облака [16].

Заключение. На основе численного анализа можно сделать вывод о том, что наиболее высокий уровень загрязнения радионуклидами поверхностного слоя Черного моря в начале мая 1986 г. имел место в районе Северокавказского побережья. Первоначальные уровни концентрации радионуклида ^{137}Cs могли достигать значений 1800-2100 Бк/м³. Рассчитанное на середину июня 1986 г. положение пятна практически воспроизводит его реальное местонахождение.

Результаты сравнения модельных расчетов с данными натурных измерений содержания ^{137}Cs в поверхностном слое Черного моря свидетельствуют о том, что предложенная модель на масштабах до одного года хорошо описывает эволюцию пятна высокой концентрации ^{137}Cs . Совпадение темпов уменьшения содержания ^{137}Cs в поверхностном слое моря, наблюдавшихся в ходе радиоэкологического мониторинга, и в модельных расчетах позволяет сделать вывод о том, что заданные для ^{137}Cs граничные условия и принятые допущения в первом приближении можно считать соответствующими реальным условиям. Опреде-

ляющим фактором в трансформации поля радиоактивности Черного моря, по крайней мере, в течение первого года после Чернобыльской катастрофы явились гидродинамические процессы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Израэль Ю.П., Петров В.Н., Авдюшин С.И. Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской атомной станции. – Метеорология и гидрология. – 1987. – № 2. – С. 5 – 18.
2. Eremeev V.N., Chudinovskikh T.V., Batrakov G.F. Artificial radioactivity of the Black Sea. – UNESCO reports in mariner science. – 1993. – № 59. – UNESCO, Paris. – 95 p.
3. Kulebakina L.G., Polikarpov G.G. Radiological monitoring of the Black Sea basin following the Chernobyl NPS accident. /Proc. Seminar on Comparative Assessment of the Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl.- Luxembourg, 1 – 5 October 1990. – Luxembourg. – Report EUR 13754. – V. II. – P. 607-648.
4. Egorov V.N., Polinec P.P., Polikarpov G.G., et. Al. ^{90}Sr and ^{137}Cs in the Black Sea after the Chernobyl NPP accident: inventories, balance and tracer applications. – J. of Environment Radioactivity – 1999. – V.43. – P. 137–155.
5. 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.
6. Livingston H.D. , Buesseler K.O., Izmar E., Konuk T. Characteristics of Chernobyl fallout in the Southern Black Sea. – In: Radionuclides: a tools for oceanography. Eds. By I.C. Guary, P. Gnequeniat, and R.I. Pentreath. Elsevier Applied Science Publishers. – Essex, U.K. – 1989. – P.204-206.
7. Kanivets V. Voitsekhovich O. Khristchuk B. Riverine transport of Cs-137 and Sr-90 into the Black Sea after Chernobyl accident (data analysis and methodological aspects of monitoring). Proc. of Symposium Marine Pollution.– IAEA. – 1999.– P. 44-52.
8. Громов В.В. Москвин А.И. Сапожников Ю.А. Техногенная радиоактивность Мирового океана. – М.: Энергоатомиздат. – 1985. – 272 c.

9. Livingston H.D., Clarke W.R., Honjo S. et al. Chernobyl fallout studies in the Black Sea and other ocean areas. — Report EML-460, Environmental Measurements Laboratory. — U.S. Dept. of Energy, N.Y. — 1986. — P.214–223.
10. Чудиновских Т.В., Земляной А.Д., Батраков Г.Ф., Еремеев В.Н. Радиоактивность Черного моря. — Севастополь: ЭКО-СИ-Гидрофизика. — 1994. — 215 с.
11. Демышев С.Г., Кныш В.В., Коротаев Г.К. Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря. — Морской гидрофизический журнал. — 2002. — №3. — С.12-27.
12. Демышев С.Г. Аппроксимация силы плавучести в численной модели бароклинических течений океана. — Известия РАН ФАО. — 1998. — Т.34, № 3. — С. 404 – 412.
13. Демышев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинических течений океана на сетке. С. — В кн.: Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. — М.: Гидрометеоиздат. — 1992. — С. 163 – 231.
14. Shapiro R. The use of linear filtering as a parametrization of atmospheric diffusion. — J. Atm. Sci.. — 1971. — V.28, N4. — P. 523 – 531.
15. 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. — 212 р.
16. Nies H. The radioactive contamination of the Baltic Sea during the years 1983-1987 and its radiological consequences. — Dutch. Hydrogr. Z. — 1988. — V. 41, №1. — P. 39-41.