

7.2. Радионуклиды стронция и цезия

Н.Ю. Мирзоева, С.Б. Гулин, О.Н. Мирошниченко

Введение

Известно, что в 1950–1960-е годы, когда было проведено наибольшее число испытаний ядерного оружия в атмосфере, максимальная плотность радиоактивных выпадений наблюдалась между 40-й и 50-й параллелью северного полушария, то есть как раз на географической широте Черного моря [Лавренчик, 1965]. Наибольшие концентрации искусственного радионуклида ^{137}Cs до аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) в поверхностном слое моря наблюдались в середине 60-х годов ($42\text{--}50 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$) и были обусловлены преимущественно атмосферными выпадениями радиоактивных веществ на акваторию моря вследствие испытаний ядерного оружия в открытых средах [Беляев и др., 1966]. В дальнейшем происходило снижение концентрации ^{137}Cs в поверхностном слое и всем объеме моря. Среднее значение концентрации ^{137}Cs по всей акватории моря в 1977 г. для горизонта 0 м, за исключением северо-западной части, составляло $15,9\pm 0,9 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$. Запас ^{137}Cs во всем объеме Черного моря, определенный в 1977 г. и откорректированный с учетом радиоактивного распада, на 1986 г. составил $1160\pm 230 \text{ ТБк}$ [Вакуловский и др., 1980; Никитин и др., 1988]. Поступление ^{90}Sr в Черное море было обусловлено как атмосферными выпадениями, так и поступлением этого радионуклида с речным стоком, в связи с чем его концентрация в поверхностном слое моря оставалась практически неизменной. В период 1964–1985 гг. средняя концентрация ^{90}Sr в поверхностном слое воды Черного моря (анализ данных 69 станций в районе Крымского побережья и северо-западной части Черного моря) составляла $15,5\pm 3,4 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ [База данных..., 2006]. Оценка запаса ^{90}Sr во всем объеме моря к 1986 г. составляла 1500 ТБк. Отношение $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ составляло примерно 2 в 1964 г., 1 в 1971 г. и менее 1 в 1977 г. Этот факт, учитывая близкие миграционные характеристики данных радионуклидов в морской среде, также свидетельствовал о существенной роли речного стока в поступлении ^{90}Sr в Черное море [Поликарпов и др., 2008а].

Произошедшая в 1986 г. ядерная авария на ЧАЭС привела к поступлению в Черное море значительного количества долгоживущих радионуклидов. В силу своего географического положения, определяющего близость к району аварии на ЧАЭС, акватория Черного моря уже в мае 1986 г. оказалась в зоне южного следа радиоактивного облака и подверглась острому радиоактивному загрязнению. Атмосферное выпадение ^{90}Sr и ^{137}Cs на акваторию Черного моря после аварии на ЧАЭС в 1986 г. составило 300 ТБк и 2400 ТБк, соответственно [Чудиновских и др., 2004; Поликарпов и др., 2008а]. Северный район центральной части моря,

прибрежные районы Крыма и Кавказа оказались наиболее загрязненными. Диапазон концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде этих регионов моря составил 185–370 и 55–130 Бк·м⁻³, соответственно [Войцехович и др., 1997; Поликарпов и др., 2008a]. В 1986 г. в поверхностном слое вод западной части Чёрного моря и у берегов Крыма зафиксировано увеличение концентрации ^{137}Cs в 10–50 раз, ^{90}Sr – в 4–9 раз по сравнению с доаварийным уровнем [Buessler, Livingston, 1996; Чудиновских и др., 2004; Поликарпов и др., 2008a]. В дальнейшем хроническое загрязнение Чёрного моря поставарийными радионуклидами происходило за счет их поступления со стоком рек [Войцехович и др., 1997; Поликарпов и др., 2008a]. Отмечено [Войцехович, 1999], что все экстремальные повышения концентрации радионуклидов, прежде всего ^{90}Sr в реках Припять и Днепр, за прошедшие после аварии годы были вызваны затоплением пойменных массивов ближней зоны ЧАЭС в результате периодических половодий и непериодических паводков (1988, 1991, 1993, 1997–2000, 2002 гг.). Кроме того, с января 2010 г. начались работы по непосредственному выведению из эксплуатации водоёма-охладителя ЧАЭС [Документы..., 2009; Ukraine..., 2014], что обеспечило постепенный сброс воды из водоёма-охладителя ЧАЭС в реку Припять. Эти работы вызывали неизбежное попадание растворенных ^{90}Sr и ^{137}Cs последовательно из воды водоёма-охладителя ЧАЭС в реку Припять, Днепр, затем через каскад днепровских водохранилищ и Северо-Крымский канал в экосистемы Чёрного, Мраморного и Средиземного морей [Gulin et al., 2013]. Прекращение подачи днепровской воды в Крым через СКК в 2014 г. [Ukraine..., 2014; СМИ..., 2014; Гулин и др., 2016] обусловило практическую остановку вторичного поступления растворенных послеаварийных радионуклидов водным путем на территорию Крыма. Стало ожидаемым уменьшение содержания этих радионуклидов в поверхностной воде Черного моря вдоль побережья Крыма, восточной части моря. При этом избыток днепровской воды стал сбрасываться с территории Херсонской области в Каркинитский залив Черного моря, в котором существуют уникальные биоценозы, например, всемирно известное поле красной водоросли филлофора.

В этой связи в период после 2014 г. возникла необходимость дать современную оценку и сделать прогноз экологической ситуации и масштабов времени радиоэкологической реакции экосистемы Черного моря на радиоактивное загрязнение его вод.

С 1986 г. отделом радиационной и химической биологии ФГБУН ИМБИ выполняются мониторинговые радиоэкологические исследования в Черном море, что позволило оценить опасность воздействия послеаварийных радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs на живые организмы черноморских экосистем [Мирзоева и др., 2008], дало возможность использовать эти радионуклиды в качестве трассеров крупномасштабной вертикальной циркуляции вод Черного моря [Стокосов, 2004; Поликарпов и др., 2008a; Egorov et al., 2001; Gulin et al., 2011]. Вместе с тем, до недавнего времени такие исследования, особенно в отношении ^{137}Cs , производились только в верх-

нем 200-метровом, реже 500-метровом слое водной толщи Черного моря [Стокозов, 2004; Gulin et al., 2001]. Это было связано с отсутствием в тот период надежных (или доступных) методов измерения содержания ^{137}Cs в относительно малых объемах воды, а отбор типичных тогда проб объемом 1000 и более литров с больших глубин был достаточно сложной задачей. В последнее время эта проблема решается с использованием новых радиоаналитических методов, позволяющих существенно уменьшить объем проб для измерения содержания ^{137}Cs , например, путем его осаждения фосфомолибдатом аммония с последующей бета-радиометрией, либо концентрирования классическим сорбционным методом и высокоэффективной гамма-или жидкостно-сцинтилляционной спектрометрией [Gulin et al., 2015]. В последнем случае в одной и той же пробе воды можно одновременно определить и ^{137}Cs , и ^{90}Sr , не используя при этом дорогостоящие трассеры радиохимического выхода цезия, что существенно повышает производительность пробоотбора и измерений. Данный метод позволил впервые за весь период после аварии на Чернобыльской АЭС получить полный профиль вертикального распределения ^{137}Cs в глубоководной толще Черного моря [Gulin et al., 2015]. Ранее такие измерения были выполнены лишь однажды и только в дочернобыльский период [Вакуловский и др., 1980].

Цель настоящего исследования заключалась в анализе современного радиоэкологического состояния Черного моря в отношении его загрязнения ^{90}Sr и ^{137}Cs после аварии на ЧАЭС.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

- проанализировать представленные в литературе и собственные результаты исследований по загрязнению ^{90}Sr и ^{137}Cs воды различных районов Черного моря;
- представить новые данные по концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в глубинной воде Чёрного моря (определение концентрации ^{137}Cs в глубинной воде (1500 м) в восточной части Чёрного моря было впервые выполнено в 2013 году);
- по результатам изучения динамики вертикального распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в водной толще за весь период после аварии на ЧАЭС с учетом упомянутых выше новых данных по распределению ^{137}Cs в глубоководной зоне черноморской водной толщи выполнить балансовую оценку поступления и содержания в прибрежной, аэробной и анаэробной водной толще Чёрного моря;
- составить прогнозные оценки времени достижения доаварийных уровней концентрации этих искусственных радионуклидов в водной толще черноморских экосистем;
- рассчитать скорость самоочищения прибрежных и глубоководных акваторий Чёрного моря от послеаварийных радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs .

В работе представлен анализ результатов радиоаналитических измерений, выполненных нами с применением стандартных методов [Поликарпов и др., 2008a] в рамках радиоэкологического мониторинга, проведенного в 1986–2017 гг. (рис. 7.2.1, табл. 7.2.1) а также данные по вертикальному распределению ^{90}Sr и ^{137}Cs в водной толще глубоководной зоны Черного моря.

Измерение активности ^{90}Sr производили по черенковскому излучению его дочернего продукта ^{90}Y с использованием низкофонового жидкостного сцинтилляционного счётчика (LSC) LKB «Quantulus 1220». Гамма-спектрометрические измерения концентрации ^{137}Cs в пробах проводились на сцинтилляционных NaI(Tl) детекторах со свинцовой защитой и усилителями ORTEC 855 Dual Spec AMP, Canberra AMP 2026, а также с помощью CompuGamma 1282 CS (LKB Wallac, Финляндия) по дочернему гамма-излучающему радионуклиду $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Относительная погрешность полученных результатов не превышала 20% [Поликарпов и др., 2008а]. В период исследований было выполнено более 1680 определений ^{90}Sr (1260), ^{137}Cs (420) в черноморской воде. Для сравнительного анализа концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде различных районов моря использовали базу данных ИМБИ [База данных..., 2006].

Контроль корректности методов и достоверности полученных результатов для ^{90}Sr и ^{137}Cs осуществляли путём международной интеркалибрации МАГАТЭ (Вена, Австрия) и Национальной Лаборатории (РИСОЕ, Дания) [Поликарпов и др., 2008а].

Оценка прогноза времени уменьшения концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде Чёрного моря до предаварийного уровня выполнена методом экстраполяции аппроксимирующей прямой экспоненциальной функции, адекватно описывающей динамику радионуклидов в экосистеме Чёрного моря [Mirzoyeva et al., 2013].



Рис. 7.2.1. Схема расположений станций отбора проб в открытой части (а) и прибрежной акватории (б, район г. Севастополя) Черного моря.

Таблица 7.2.1

Средние концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr в морской воде северо-западной части Черного моря и района Крымского побережья в период до и после аварии на ЧАЭС

Год, дата	Концентрация ^{137}Cs , Бк м ⁻³	Концентрация ^{90}Sr , Бк·м ⁻³
До 26 апреля 1986 г.	14 – 15	15
После 26 апреля 1986 г.	143 ± 43	28–53
1987	84 ± 25	22 ± 3
1988	79 ± 24	24 ± 6
1989	76 ± 1.3	21 ± 1
1989	76 ± 1.3	21 ± 1
1990	69 ± 21	23 ± 2
1991	31 ± 9	Нет данных
1992	36 ± 11	20 ± 1
1993	36 ± 11	22.0
1994	27.7	27.3
1995	28 ± 8	15.0
1998	24 ± 6	20 ± 4
2000	24 ± 2	19 ± 4
2011	14.9 – 56.1	6.7 – 32.1
2013	17.1±0.9	12.5 – 24.8
2014	13.8± 1.2*	7.1± 1.3*
2015	14.4± 1.3*	8.2± 1.3*
2016	16.1± 2.4*	7.2± 1.3*
2017	15.3± 0.7*	7.9± 1.4*

*результаты получены в период после закрытия Северо-Крымского канала [Ukraine..., 2014; СМИ..., 2014].

Уточнение периодов обмена вод окислительной и восстановительной зон проводилось с применением модели крупномасштабного радиоизотопного, солевого и водного баланса Черного моря [Стокосов, 2004]. Для параметризации этой модели использовались данные по изменению профилей вертикального распределения осколочных радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде в течение постчернобыльского периода. Компоненты водного баланса, включая сток рек, испарения, осадки и водообмен через черноморские проливы, определялись по результатам многолетних гидрометеорологических наблюдений [Voitsekhovitch et al., 1998, 2004], а осредненные профили вертикального распределения солености вод оценивались по многочисленным данным гидрологических съемок [Поликарпов и др., 2008a].

Хронологические тенденции горизонтального распределения средних концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs в поверхностном слое морской воды северо-западной части и района Крымского побережья Черного моря обобщены по нашим современным и

опубликованным данным [IAEA, 2004; База данных..., 2006; Поликарпов и др., 2008а; Gulin et al., 2013; Tereschenko et al., 2014] и представлены в табл. 7.2.1.

Сравнительное распределение концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs в поверхностном слое воды Черного моря в 2011 и 2014–2017 гг. (за 3 года до и в период после прекращения подачи воды из Северо-Крымского канала (СКК) на территорию Крыма, соответственно) представлено на рис. 7.2.1–7.2.4.

Полученные результаты (см. табл. 7.2.1) свидетельствуют о периодическом вторичном поступлении ^{137}Cs и ^{90}Sr в акваторию Черного моря в период до 2014 г., т.е. до момента прекращения подачи днепровской воды через Северо-Крымский канал [Ukraine..., 2014; СМИ..., 2014]. В 2011 и 2013 гг. для ^{137}Cs и ^{90}Sr еще отмечались концентрации, превышающие доаварийные уровни этих радионуклидов в 3,7 и в 1,7 раза, соответственно (см. табл. 7.2.1, рис. 7.2.2).

С прекращением подачи днепровской воды в Крым через СКК [Ukraine..., 2014; СМИ..., 2014] уменьшился вынос послеаварийных радионуклидов, прежде всего ^{90}Sr , из бассейна р. Днепр в Черное море (см. табл. 7.2.1).

Получено (см. рис. 7.2.3), что гидрологические, гидрохимические, биогеохимические процессы, происходящие в Черном море, обеспечили в период 2014–2016 гг. уменьшение содержания ^{90}Sr в поверхностной воде Черного моря к величинам ниже доаварийных уровней. Основную роль в распределении ^{90}Sr в поверхностном слое по акватории Черного моря играют гидрологические процессы, прежде всего, перенос морскими течениями. Наибольшие концентрации

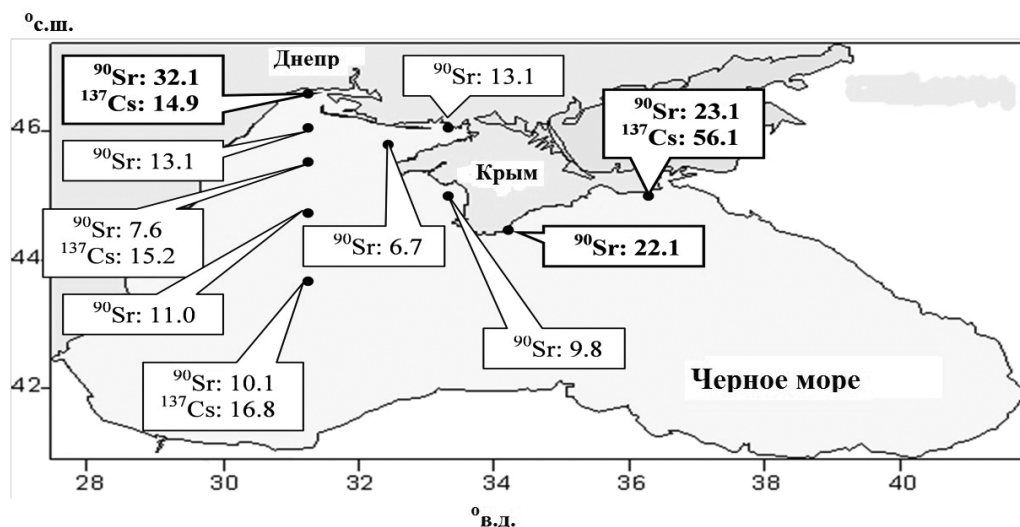


Рис. 7.2.2. Распределение концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs (Бк·м⁻³) в поверхностной воде Черного моря (август, 2011) [Gulin et al., 2013; Mirzoyeva et al., 2013].

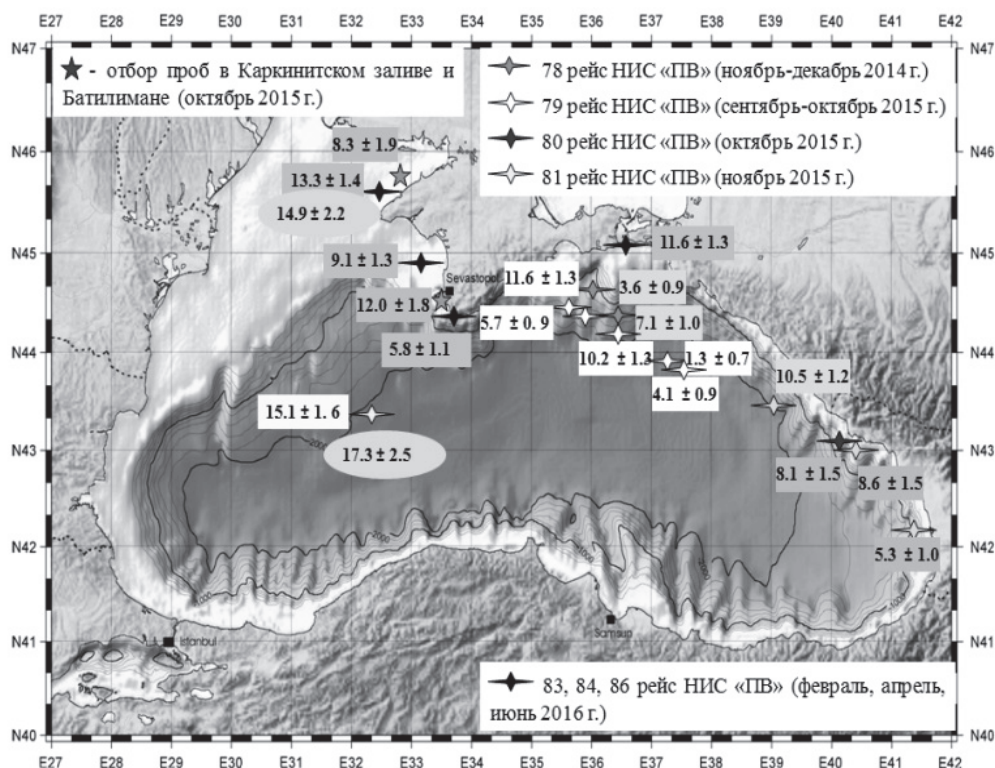


Рис. 7.2.3. Распределение концентрации ^{90}Sr (Бк·м⁻³) в поверхностной воде Черного моря в период 2014–2016 гг.

в поверхностной воде Черного моря отмечены нами (см. рис. 7.2.3) в Каркинитском заливе, прикерченском районе, западной халистазе, юго-восточной части Черного моря. Это было обусловлено, прежде всего, периодическим вторичным поступлением ^{90}Sr с водами Днепра в северо-западную часть моря, паводковыми водами с прибрежных территорий и всего водосборного бассейна, переносом радионуклида морскими течениями в глубоководные районы моря. Подтверждением этому служат результаты наших исследований по сезонному распределению ^{90}Sr в поверхностной воде Черного и Азовского морей вдоль побережья Крыма в 2016–2017 гг. (см. рис 7.2.4).

В период 2016–2017 гг. продолжалось вторичное поступление растворенного ^{90}Sr водным путем в Черное и Азовское моря. Наибольшие концентрации ^{90}Sr наблюдались в Каркинитском заливе, в районе п-ова Тарханкут, прикерченском и

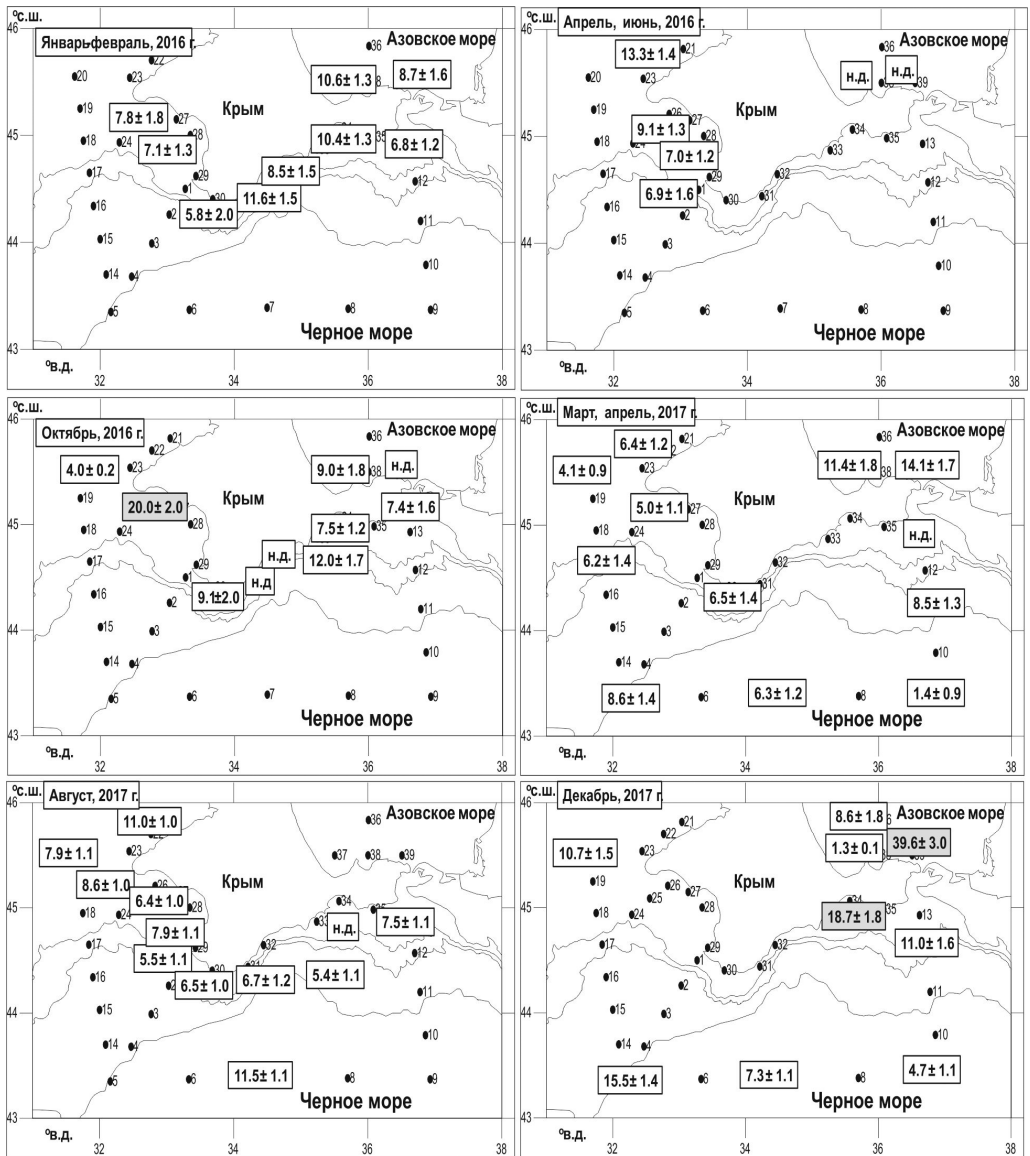


Рис. 7.2.4. Сезонное распределение концентрации ^{90}Sr (Бк·м⁻³) в поверхностной воде Черного моря в период 2016–2017 гг.

глубоководном районах Черного моря (см. рис. 7.2.4). В октябре 2016 г. и декабре 2017 г. в районе п-ова Тарханкут, Феодосийском заливе, а также в районе западной халистазы в поверхностной воде Черного моря наблюдалось повышение концентрации ^{90}Sr до уровней, превышающих доаварийные (см. табл. 7.2.1, рис. 7.2.4). Уменьшение концентрации ^{90}Sr в поверхностной воде моря вдоль разреза западная халистаза – промежуточная станция – восточная халистаза (см. рис. 7.2.4) свидетельствует о поступлении этого искусственного радионуклида из Северо-Западного района в глубоководные районы Черного моря. Концентрация ^{90}Sr в воде Азовского моря в декабре 2017 г. при выходе в Керченский пролив составляла $39,6 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ (см. рис. 7.2.4), что соответствовало уровню концентрации этого радионуклида, отмечаемому сразу после аварии на ЧАЭС 1986 г. в поверхностной воде Черного моря (см. табл. 7.2.1).

Считаем, что в данном случае воды Азовского моря, поступающие через Керченский пролив [Альтман, 1973], являются загрязняющим фактором для вод Черного моря ^{90}Sr , о чем свидетельствует превышающее в 1,2 раза содержание этого искусственного радионуклида в воде Черного моря в Феодосийском заливе (см. рис. 7.2.4).

На основании ретроспективного анализа [База данных..., 2006; Поликарпов и др., 2008а], полученных в 2011 г., 2015–2017 гг. значений концентраций ^{90}Sr в воде Днепровско-Бугского лимана и Каркинитского залива Черного моря нами определен период уменьшения вдвое ($T_{0,5}$), сделан прогноз времени уменьшения концентрации ^{90}Sr к доаварийному уровню в воде исследуемого района моря (рис. 7.2.5).

Прогнозное время уменьшения концентрации ^{90}Sr в этом районе равно 6,4 года (см. рис. 7.2.5), а время полного уменьшения содержания радионуклида до предаварийного уровня было оценено в 32 года (к 2018 г.) [Mirzoyeva et al., 2013], что в 4,7 раза, соответственно, меньше времени существования 97% атомов этого радионуклида. Однако в связи с прекращением подачи днепровской воды через СКК [Ukraine..., 2014; СМИ..., 2014] снижение концентрации ^{90}Sr до предаварийного уровня и ниже в поверхностной воде Каркинитского залива наблюдалось уже в 2014 г., т.е. через 28 лет после аварии на ЧАЭС. Другими словами, гидрологические, биогеохимические, физические и антропогенные факторы уменьшили период нахождения послеаварийного радионуклида в воде исследуемого района в 5,2 раза по сравнению с 5-кратным периодом полураспада этого радионуклида (распадается около 97% имевшихся первоначально радиоактивных ядер).

Определено, что в 2017 г. концентрация ^{137}Cs равномерно распределялась в поверхностном слое воды Черного моря ($14\text{--}16 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$) как на глубоководных, так и на прибрежных станциях. Продолжается увеличение концентрации ^{137}Cs в сероводородной зоне Черного моря (табл. 7.2.2) [Гулин и др., 2017].

В период 2017 г. концентрация ^{137}Cs в поверхностном слое воды в Азовском море (см. табл. 7.2.2) была в 1,8–3 раза ниже, чем в Черном море. Причем концентрация этого радионуклида в воде уменьшалась по мере удаления от Керченского

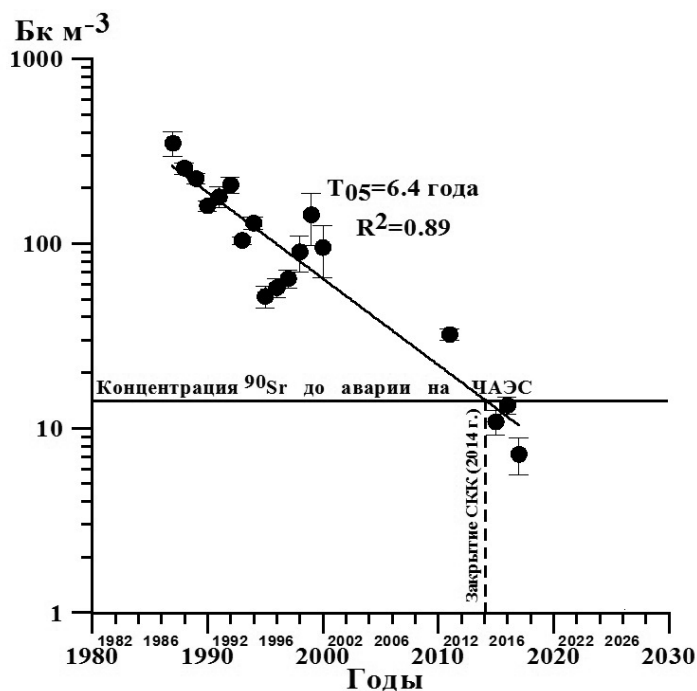


Рис. 7.2.5. Динамика изменения средней концентрации ^{90}Sr в воде Днепроовско-Бугского лимана и Каркинитского залива Черного моря в период 1986–2017 гг.

пролива, что свидетельствует о хроническом поступлении ^{137}Cs в Черное море, а также о поступлении этого радионуклида с черноморскими водами через Керченский пролив в Азовское море. Различия в распределении ^{137}Cs в глубоководных слоях определяются характером вертикального водообмена в разных районах моря [Поликарпов и др., 2008а]. Для западной и восточной халистаз концентрация ^{137}Cs на глубине 200 м составляла около 5 Бк м^{-3} , тогда как для станции на разрезе восточная халистаза–Керчь на той же глубине она была равна 7,6 Бк м^{-3} . Дополнительное влияние на профиль распределения ^{137}Cs может оказывать вторичное хроническое поступление радионуклида со стоком рек в северо-западный район Черного моря [Гулин и др., 2017].

Выявлено [Стокозов, 2004; Мирзоева и др., 2008; Поликарпов и др., 2008а], что в период после аварии на ЧАЭС снижение концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в поверхностных водах Чёрного моря определялось перемешиванием вод в слое 0–50 м и вертикальной миграцией ^{90}Sr и ^{137}Cs в глубинные воды, преимущественно в слое 0–200 м, начиная с 1986 г. (рис. 7.2.6).

Результаты исследований вертикального распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в районе западного циклонического круговорота Черного моря, полученные в 2000, 2013,

Таблица 7.2.2

**Распределение концентрации ^{137}Cs в воде Черного и Азовского морей
в 2017 г. (март–апрель)**

Район Черного и Азовского морей	Координаты с.ш., в.д.	Глубина, м	Концентрация ^{137}Cs , Бк·м ⁻³	
			4	5
1	2	3	4	5
Западная халистаза (ЗХ)	43. 21,160 32. 09,540	1970-2030	0 м	15,15±0,647
			200 м	5,226±0,207
			400 м	7,43±0,47
Разрез ЗХ – Восточная халистаза (ВХ)	43. 23,419 34. 29,571	2183	0 м	14,118±0,726
			200 м	6,75±0,35
ВХ	43. 22,397 36. 55,601	2100	0 м	14,47±0,612
			200 м	5,731±0,23
			500 м	2,72±0,11
Разрез ВХ – Керченский район	44. 08,881 36. 47,750	1959	0 м	15,203±0,652
			200 м	7,56±0,31
Траверз Керченского пролива	44. 55,840 36. 35,520	44	0 м	14,7±0,64
Разрез северо-западного шельфа (СЗШ) к ЗХ	44. 39,000 31. 50,336	1359	0 м	14,56±0,61
			1320 м	0
СЗШ	45. 33,024 31. 37,247	48	0 м	15,55±0,68
Каркинитский залив	45. 37,226 32. 45,972	22	0 м	15,07±0,59
Каламитский залив	45. 12,500 32. 49,800	59	0 м	15,12±0,64
Бухта Ласпи-1	44. 24,200 33. 40,800	67	0 м	15±0,66
Бухта Ласпи-2	44. 24,508 33. 41,592	60	0 м	13,8±0,57
Азовское море	45. 29,995 35. 30,366	9	0 м	5,78±0,24
Азовское море	45. 30,118 36. 00,204	10	0 м	4,92±0,2
Азовское море	45. 29,960 36. 30,600	11	0 м	8,29±0,38

2015 и 2017 гг. представлены в табл. 7.2.3 и на рис. 7.2.7. Они позволили проследить динамику содержания этих радионуклидов в водной толще Черного моря за весь постчернобыльский период, а также оценить их распределение в кислородной и сероводородной зонах.

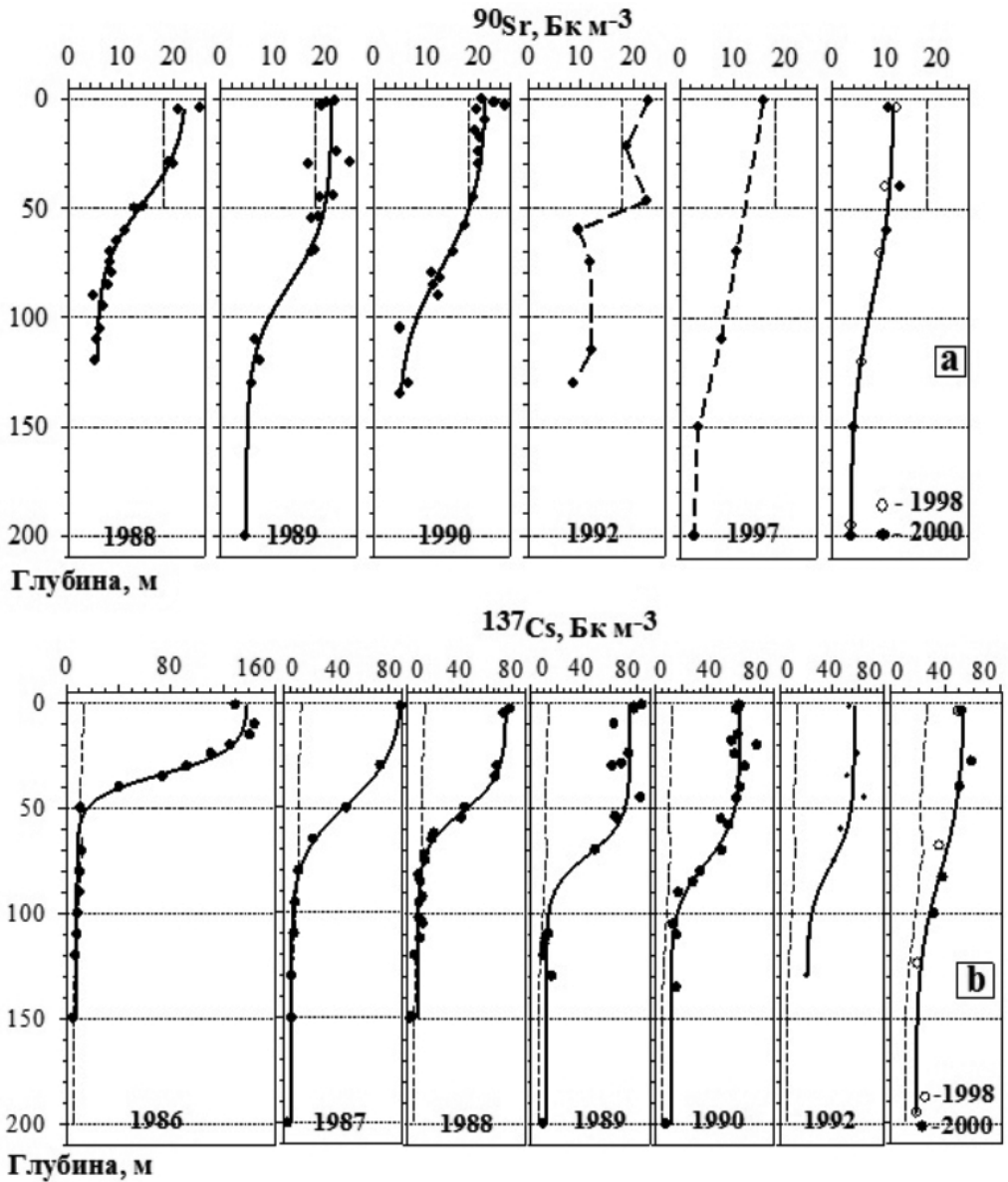


Рис. 7.2.6. Профили вертикального распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде в западной халиптической зоне Черного моря [Стокозов, 2004; Egorov et al., 1999].

На рис. 7.2.6, 7.2.7 и в табл. 7.2.3 видно, что к 2017 г. система биогеохимического кондиционирования содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в верхней 100-метровой толще воды Черного моря практически вышла на стационарный уровень, то есть потоки поступления этих радионуклидов в поверхностные слои моря в настоящее время уравниваются их радиоактивным распадом и миграцией в глубинные слои. Определено, что динамика заглублиения не зависела от концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs и в целом совпадала у обоих радионуклидов (см. рис. 7.2.6). Это отражает влияние крупномасштабной вертикальной циркуляции водных масс в глубоководном бассейне Черного моря. Причем максимальная интенсивность вертикального перемешивания вод соответствовала слою воды 0–50 м, а ее снижение наблюдалось в слое сезонного пикноклина с дальнейшим уменьшением на нижней границе кислородной зоны Черного моря.

Получено (см. рис. 7.2.6, 7.2.7; рис. 7.2.8, 7.2.9), что концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в поверхностном слое и до 200 м значительно превышают содержание этих радионуклидов в глубоких слоях Черного моря. Это свидетельствует о хроническом вторичном поступлении поставарийных радионуклидов в поверхностные слои моря, их распространении с морскими течениями по всему водоему, заглублиению и накоплении ^{90}Sr и ^{137}Cs в сероводородной зоне Черного моря.

В 2017 г. были получены результаты распределения концентрации ^{90}Sr в различных слоях водной толщи на промежуточной станции между восточным и западным круговоротами Черного моря, восточной халистазе (рис. 7.2.10). Отмечается более быстрое распределение ^{90}Sr вглубь толщи морской воды в западном

Таблица 7.2.3

Вертикальное распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs в водной толще глубоководной зоны Черного моря (район западного циклонического круговорота, май 2013 г.)

Глубина, м	^{90}Sr		^{137}Cs	
	Бк·м ⁻³	± 1σ	Бк·м ⁻³	± 1σ
0	9,75	1,10	17,26	2,69
10	9,94	1,27	10,66	1,64
40	7,94	1,48	11,56	1,79
50	9,41	1,20	10,37	1,60
90	8,02	1,49	8,03	1,27
200	3,54	0,66	4,03	0,68
300	2,02	0,85	2,00	0,48
500	1,83	0,87	1,72	0,70
1000	0,91	0,87	4,41	0,76
1750	3,03	1,08	1,29	0,68

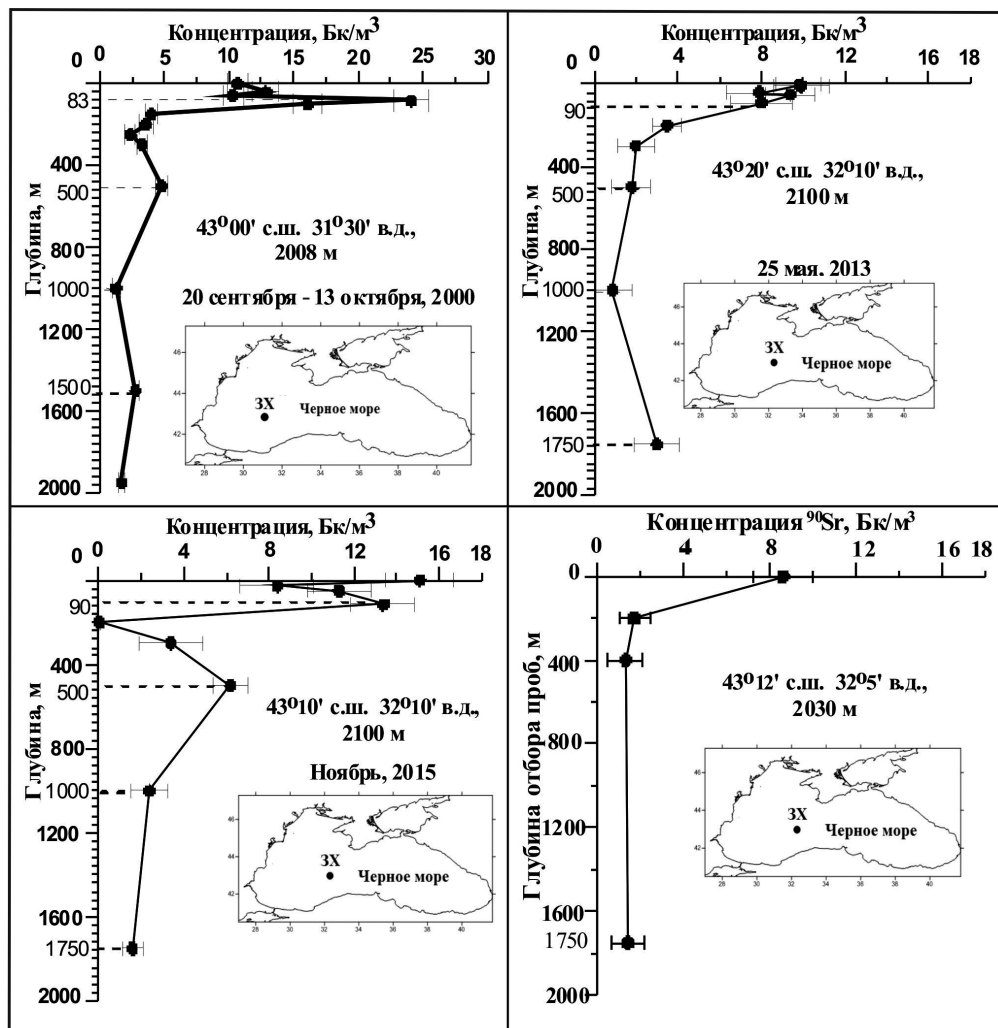


Рис. 7.2.7. Профили вертикального распределения ^{90}Sr в воде западной халистатической зоны (3X) Черного моря в период 2000, 2013, 2015, 2017 гг.

и восточном круговороте по сравнению с промежуточной станцией. При этом ^{90}Sr на глубине 2000 м определялся только в профиле западной халистатической зоны (см. рис. 7.2.7, 7.2.10). Такое распределение объясняется, прежде всего, более близким расположением центра западного круговорота к северо-западной части Черного моря, района, куда растворенный постварийный ^{90}Sr выносится с водами Днепра в Днепровско-Бугский лиман, Каркинитский залив, затем переносится морскими течениями в западные, центральные, восточные районы моря.

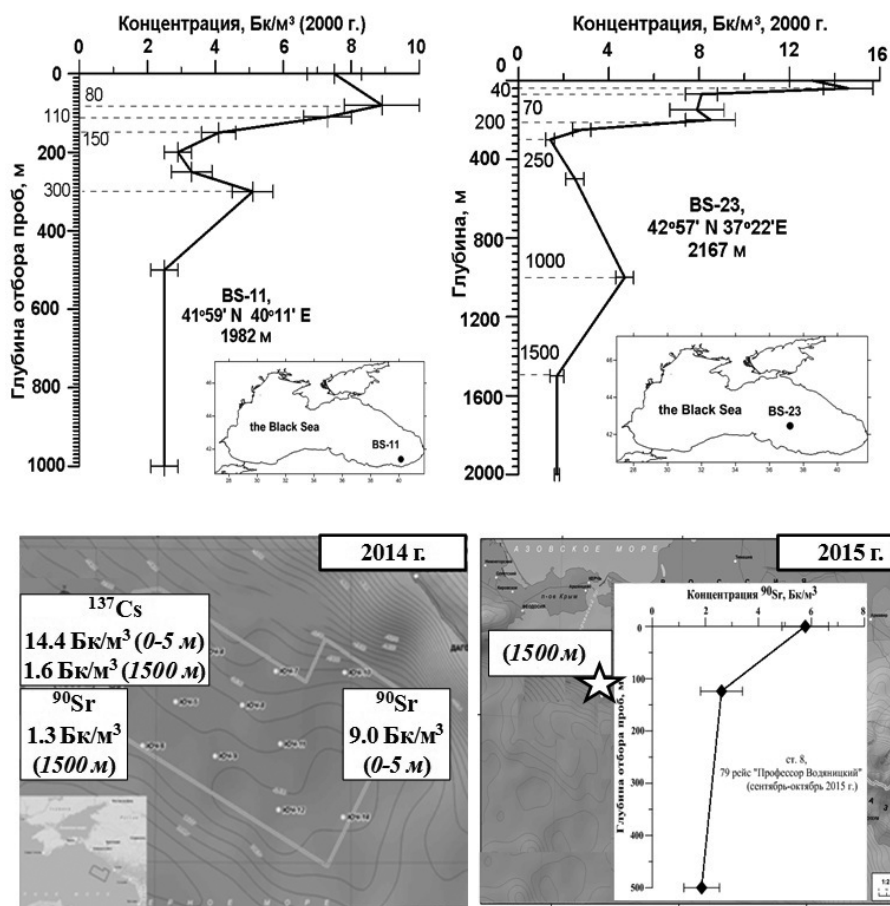


Рис. 7.2.8. Концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в толще (0–2000 м послойно) воды глубоководной зоны восточной части Черного моря (2000, 2014, 2015 гг.).

Вертикальные гидрологические процессы, характеризующиеся скоростью водообмена с подстилающими слоями, влияют на послойное распределение радиоактивного загрязнения в различных районах моря [Стокозов, 2004; Egorov et al., 1999]. Так, в центре круговоротов Черного моря эта величина составляет $35 \text{ м}\cdot\text{год}^{-1}$, тогда как в других районах моря скорость водообмена изменяется от 10 до $14 \text{ м}\cdot\text{год}^{-1}$ [Стокозов, 2004; Поликарпов, 2008].

Представлены компоненты баланса содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в Чёрном море до и после аварии на ЧАЭС (рис. 7.2.11), полученные на основе обобщенного анализа первичных данных, опубликованных материалов [Gudiksen et al., 1991; Войцехович и др., 1997; Апллби и др., 1999 ; Чудиновских и др., 2004; База данных...,

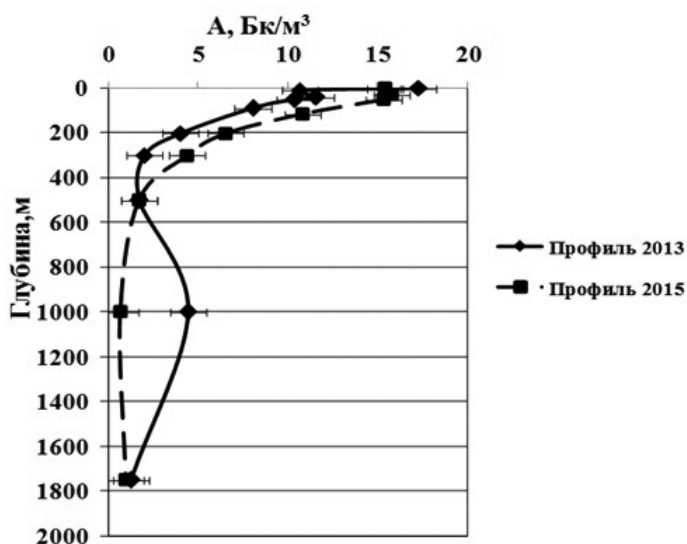


Рис. 7.2.9. Профиль распределения концентрации ^{137}Cs в районе западного циклонического круговорота.

2006; Поликарпов и др., 2008a]. Изучение радиэкологического отклика Черного моря на чернобыльскую аварию показало, что основными факторами образования полей радиоактивного загрязнения были атмосферные выпадения на поверхность моря, поступление радионуклидов в кислородную зону со стоком рек, их вынос через проливы, миграция в глубоководную зону и седиментационное удаление в толщу донных отложений (см. рис. 7.2.11).

Поступление ^{90}Sr с атмосферными выпадениями на акваторию Черного моря составило в 1986 г. 100–300 ТБк, а ^{137}Cs – 1700–2400 ТБк. За период 1986–2000 гг. со стоком самых крупных черноморских рек – Днестра и Дуная в море поступило 160 ± 28 ТБк ^{90}Sr и $22,6 \pm 5,4$ ТБк ^{137}Cs (см. рис. 7.2.11) [Егоров и др., 2008]. Таким образом, суммарное поступление ^{90}Sr в акваторию Черного моря с 1986 по 2000 гг. можно оценить величиной, равной 260–460 ТБк, а ^{137}Cs – 1723–2423 ТБк. К 2000 г. седиментационное депонирование ^{90}Sr в толще донных отложений Черного моря составило всего 0,4 ТБк, или 0,09–0,15% от общего поступления этого радионуклида в море за указанный период, а ^{137}Cs , соответственно, – 40 ТБк, или 1,6–2,3% [Егоров и др., 2008; Gulin et al., 2011]. Из этих оценок следует, что депонирование ^{90}Sr и ^{137}Cs в толще донных отложений было незначительным по сравнению с содержанием чернобыльских радионуклидов в кислородной и сероводородной зонах Черного моря. Поэтому можно рассматривать водную массу этих зон, особенно сероводородную, как основные депо чернобыльского ^{90}Sr и ^{137}Cs . Это подтверждается

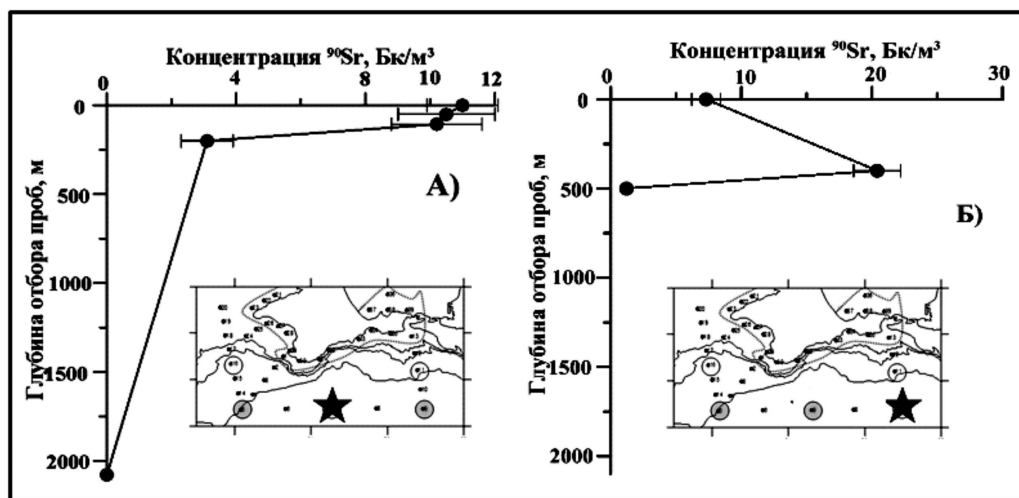


Рис. 7.2.10. Распределение концентрации ^{90}Sr в толще воды промежуточной станции между халистазами (А) и в восточной халистазе (Б) Черного моря (март–апрель 2017 г.).

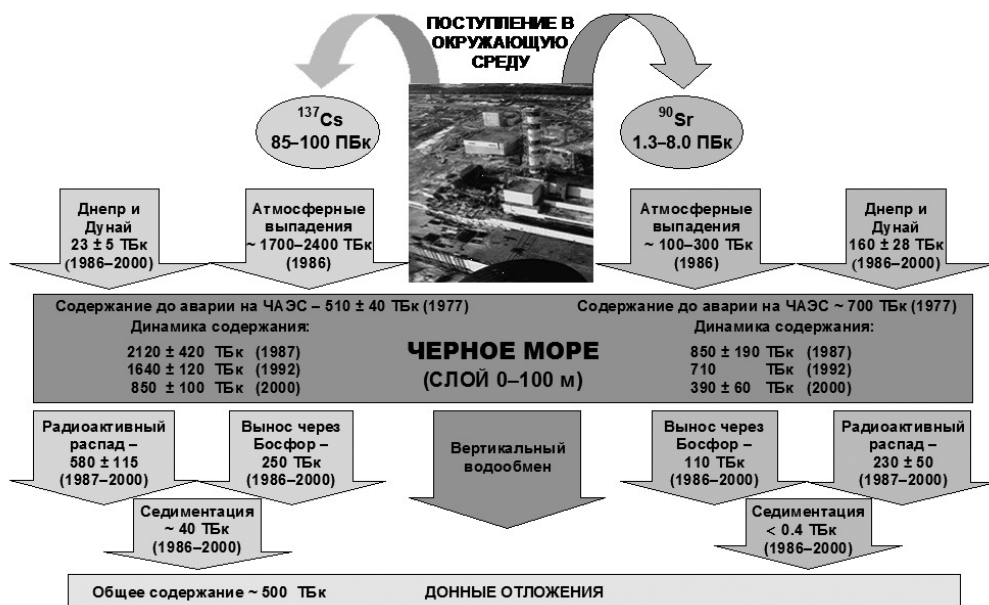


Рис. 7.2.11. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в слое 0–100 м воды Черного моря до аварии на ЧАЭС и в период 1987–2000 гг. и балансовые компоненты [Поликарпов, 2008а].

рассчитанными показателями крупномасштабной циркуляции вод кислородной и сероводородной зон Черного моря (табл. 7.2.4) [Гулин и др., 2017].

Определено (см. табл. 7.2.4) [Гулин и др., 2017], что в результате комплексного воздействия гидродинамических процессов поток вод через границу кислородной и сероводородной зон моря при крупномасштабном осреднении может составлять от 3120 до 10 920 км³·год⁻¹. При этом период обмена вод окислительной зоны может быть оценен в 6,5–23 г., а сероводородной – в 43–152 г., что в целом соответствует опубликованным ранее интегральным оценкам скорости вертикальной циркуляции вод Черного моря [Водяницкий, 1948; Богданова, 1959; Скопинцев, 1975]. Аналогичные данные были получены и для зоны ОЧТ, протекающего по периферии глубоководного бассейна Черного моря [Стокозов, Егоров, 2008]. По результатам этих исследований установлено, что период вертикальной циркуляции черноморских вод в слое 0–50 м может быть оценен в 5 лет, период полного обновления воды в нижней части пикноклина в 15–25 лет, а всего объема моря в 140 лет [Егоров и др., 1993].

Расчеты, выполненные нами в 2016 г. с использованием данных из табл. 7.2.4, показали, что в Черном море в 2013 г. содержалось 1670 ТБк ⁹⁰Sr, из которых 547,7 ТБк находились в его кислородной, а 1123,3 ТБк в сероводородной зоне. Сравнение этих данных с количеством ⁹⁰Sr, поступившим за период с 1986 по 2000 гг. (260–460 ТБк), показало, что к 2013 г. пул этого радионуклида возрос в 3,6–6,4 раза за счет его накопления в сероводородной зоне Черного моря. Аналогичные расчеты показали, что к 2013 г. содержание ¹³⁷Cs в черноморских водах возросло

Таблица 7.2.4

**Показатели крупномасштабной циркуляции вод кислородной
и сероводородной зон Черного моря**

Окислительная зона					
Интервал глубин, м	Площадь поверхности на нижней границе зоны, км ²	Объем, км ³	Водообмен с подстилающими слоями		Период водообмена T _{об.} через нижнюю границу, лет
			м·год ⁻¹	T _{об.} км ³ ·год ⁻¹	
0-200	423 000	71 110	10-35	3120-10 920 5050,1*	6,5-23,0 14,1*
Сероводородная зона					
Интервал глубин, м	Площадь поверхности на верхней границе, км ²	Объем, км ³	Водообмен (T _{об.}) с водами окислительного слоя		Период водообмена T _{об.} сероводородной зоны, лет
			м·год ⁻¹	км ³ ·год ⁻¹	
200-2212	312 000	475 890	10-35	3120-10 920 5051*	43,0-152,0 94,2*

* оценка, полученная по результатам моделирования [Стокозов, 2004];

T_{об.} – период водообмена.

в 1,2–1,6 раза (до 2843 ТБк), из которых 953 ТБк было депонировано в кислородной, а 1890 ТБк в сероводородной зонах моря. Таким образом, анализ представленных данных выявил более высокий темп загрязнения глубинных вод Черного моря ^{90}Sr , чем ^{137}Cs , что, по-видимому, обусловлено значительным поступлением этого радионуклида со стоком рек.

Прогнозные оценки времени достижения доаварийных уровней концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде и балансовых компонентах черноморских экосистем представлены в табл. 7.2.5.

Получено (см. табл. 7.2.5), что гидрологические, биогеохимические, физические процессы, происходящие в Черном море, а также антропогенная деятельность в среднем уменьшают в 2–6 раз нахождение послеаварийных искусственных радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs по сравнению с 5-кратным периодом полураспада этого радионуклида.

Таким образом, полученные нами данные свидетельствуют о том, что с прекращением подачи днепровской воды в Крым через СКК уменьшился вынос послеаварийных радионуклидов из бассейна р. Днепр в Черное море, прежде всего, в прибрежный район Крыма. Однако избыток днепровской воды в перекрытом дамбой СКК стал сбрасываться с территории Херсонской области в Каркинитский залив Черного моря и, возможно, в Азовское море. Это обуславливает хроническое вторичное поступление ^{90}Sr и ^{137}Cs в различные районы моря. В 2017 г. концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в поверхностном слое и до 200 м значительно превышали содержание этих радионуклидов в глубоких слоях Черного моря. Это свидетельствует о хроническом вторичном поступлении этих искусственных радионуклидов в поверхностные слои моря, их распространении с морскими течениями по всему водоему, заглублиению и накоплению ^{90}Sr и ^{137}Cs в сероводородной зоне Черного моря. Результаты исследований по вертикальному распределению концентраций

Таблица 7.2.5

Периоды полууменьшения ($T_{0,5}$) и время полного снижения ($T=5 T_{0,5}$) концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде различных районов Черного моря к доаварийным уровням (годы)

Компоненты	^{90}Sr		^{137}Cs	
	$T_{0,5}$	T	$T_{0,5}$	T
Поступление с водами реки Днепр	7,0	36,0	2,0	11,0
Поступление с водами реки Дунай	14,4	73,0	6,9	35,5
Вынос через пролив Босфор	9,5	47,5	6,4	32
Поверхностные воды Днепровско-Бугского лимана	6,4*	28,0*	-	-
Поверхностные воды центра Западного циклонического круговорота Черного моря	9,9	49,5	6,1	30,5
Поверхностные воды Севастопольской бухты	8,8	45,0	6,1	30,5

*прогнозное время рассчитано с учетом последствий закрытия СКК в 2014 г.

^{90}Sr и ^{137}Cs в толще воды различных районов Черного моря позволили определить запас этих радионуклидов в море. К 2013 г. содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в Чёрном море оценивалось в 1670 ТБк и 2843 ТБк, соответственно, что в 3,6–6,4 и в 1,2–1,6 раза было выше содержания этих радионуклидов в 2000 г. При этом 66% ^{137}Cs и 67% ^{90}Sr от общего содержания радионуклидов в толще воды находилось в сероводородной зоне Чёрного моря. Время реакции экосистемы Черного моря, как открытой его части, так и локальных регионов на постчернобыльское загрязнение составило 28,0–73,0 г. для ^{90}Sr и 11–35,5 г. для ^{137}Cs . Основными факторами формирования радиоактивного загрязнения вод в Чёрном море являются: атмосферные выпадения на поверхность моря, поступление радионуклидов в кислородную зону со стоком рек, течения, водообмен с Азовским морем, вынос радионуклидов через проливы, скорости вертикального обмена между слоями, миграция в глубоководную зону, седиментационное удаление в толщу донных отложений, радиоактивный распад.

Период круговорота ^{90}Sr и ^{137}Cs в кислородной и сероводородной зонах Черного моря составляет около 14 и 94 лет, соответственно. В последнем случае эта величина втрое превышает период полураспада ^{90}Sr и ^{137}Cs , поэтому сероводородная зона водной толщи Черного моря может рассматриваться как депо для данных радионуклидов.

Работа выполнена по теме государственного задания ФГБУН ИМБИ «Суперпозиция физических, химических и биологических процессов в формировании качества морской среды и функционального состояния гидробионтов в Азово-Черноморском бассейне» № АААА-А18-118020790154-2.