

УДК 551.510.72+550.378+556.531.4+551.464

ДИНАМИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА, ПОЧВЫ И ВОДЫ ТЕХНОГЕННЫМИ РАДИОНУКЛИДАМИ НА ТЕРРИТОРИИ СССР И РОССИИ В 1954—2000 гг.*Махонько К.П., Ким В.М. (НПО «Тайфун»)*

Первые ядерные взрывы, проведенные в 1945 г., сопровождались, в основном, локальным загрязнением окружающей природной среды техногенными радионуклидами. При мощных термоядерных взрывах в 1952—1954 гг. радиоактивные продукты забрасывались в стратосферу и быстро распространялись по планете, что вызвало повсеместное радиоактивное загрязнение основных объектов природной среды — воздуха, воды и почвы. В СССР систематические ежедневные наблюдения за выпадениями радиоактивных продуктов ядерных взрывов из атмосферы на землю начались с марта 1954 г. на 120 метеостанциях. Синоптическое обеспечение работ по испытаниям ядерного оружия на полигонах СССР осуществлял Центральный институт прогнозов Гидрометслужбы. Кроме прогнозов атмосферного переноса радиоактивных облаков, образующихся при ядерных взрывах, проводили также сбор и обработку оперативной информации о результатах ежедневных наблюдений за β - и γ -излучением на метеоплощадках.

Изучение глобального радиоактивного загрязнения объектов природной среды продуктами ядерных взрывов и научно-методическое обеспечение работ было сосредоточено на Обнинском полигоне Института прикладной геофизики АН СССР (ныне НПО «Тайфун»). Так начала создаваться система сбора, обработки и обобщения информации о радиационной обстановке на территории страны с выпуском ежегодников.

Для отдельных видов наблюдений максимальное число пунктов радиационного мониторинга окружающей среды за потоком β -излучения с земной поверхности и мощностью экспозиционной дозы γ -излучения составляло 2467, радиоактивными выпадениями (потоком радиоактивных аэрозолей из атмосферы на земную поверхность) — 527, концентрацией радиоактивных аэрозолей в воздухе — 89, радиоактивного благородного газа ^{85}Kr в воздухе — 3, ^{90}Sr в реках и водоемах — 140, ^{90}Sr в морской воде — 37, выпадениями ^3H из атмосферы и его концентрацией в осадках — 47, концентрацией ^3H в реках и водоемах — 62, ^3H в морской воде — 6.

Плотность загрязнения почвы радионуклидами, как правило, определяли при экспедиционных обследованиях территории СССР или ее отдельных районов, и только в течение двух лет пробы почвы отбирали на метеостанциях страны. Экспедиционные работы проводили также на морях и в тропосфере.

Со временем стало уделяться внимание и мониторингу окружающей среды в районах расположения возникающих промышленных объектов, представляющих потенциальную радиационную опасность. После прекращения ядерных взрывов в атмосфере это направление приобрело определяющее значение и стало составлять основное содержание издаваемых ежегодников о радиационной обстановке в стране (см., например, [1]). Определенное влияние на это оказали и последствия двух крупных радиационных аварий, произошедших в 1957 г. в ПО «Маяк» и в 1986 г. на Чернобыльской АЭС. Впервые более плотная сеть пунктов радиационного контроля была создана Гидрометслужбой в 100-км зоне вокруг ПО «Маяк» после аварии 1957 г. Впоследствии такие 100-км зоны контроля были созданы вокруг всех основных радиационно опасных объектов. Система радиационного мониторинга Гидрометслужбы достаточно эффективно проявила себя при аварии на Чернобыльской АЭС. Первая информация о произошедшей аварии поступила в Госкомгидромет в тот же день 26 апреля 1986 г. в 9 ч утра именно по результатам наблюдений за мощностью экспозиционной дозы γ -излучения на метеостанции Чернобыля. Регулярно действовавшая радиометрическая сеть метеостанций позволила в первый же день оценить масштабы аварии и в последующем регистрировать динамику радиоактивного загрязнения территории страны.

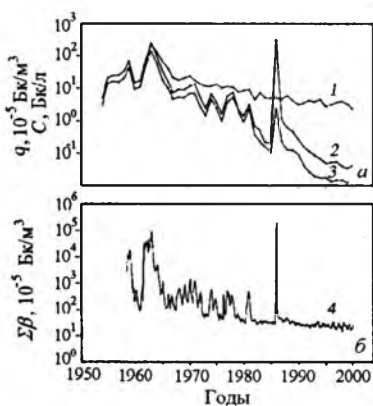
На основании данных о выпадении ^{131}I и известных данных о его движении по пищевой цепочке трава—корова—молоко для европейской части СССР в НПО «Тайфун» была рассчитана карта смещения со временем границ зоны свободного выпаса молочного скота, внутри которой потребление загрязненного молока привело бы к внутреннему переоблучению местного населения. Эта карта уже 10 мая была отправлена с нарочным в Госкомгидромет, где оперативный дежурный круглосуточно принимал информацию. Впоследствии она была опубликована в ежегоднике за 1986 г. [2] и журналах [3, 4]. Наиболее интенсивные выпадения радиоактивных продуктов аварии в основном продолжались до конца мая, после чего стала возможной оценка загрязнения территории всей страны и построение в НПО «Тайфун» по этим данным ориентировочных карт накопления выпадений ^{131}I , ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{89}Sr на почве [2]. Детальность этих карт была невелика и определялась числом метеостанций, на которых отбирали пробы выпадений, но эти карты были получены быстро, уже в июне 1986 г., и стали основой для более подробной авиационной и наземной γ -спектрометрической съемки европейской части территории страны, которая продолжалась в течение нескольких лет. Непрерывные измерения мощности экспозиционной дозы γ -излучения на метеостанциях позволили рассчитывать дозу внешнего облучения местного населения, результаты γ -спектрометрии проб выпадений — динамику вклада отдельных радионуклидов в суммарную дозу.

После аварии на Чернобыльской АЭС было подготовлено и выпущено руководство по организации контроля состояния природной среды [5] и начаты работы по созданию Единой государственной автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (ЕГАСКРО), которые продолжают по настоящее время.

Изменение среднегодовой и среднемесячной концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr , $\Sigma\beta$ (суммарной β -активности) в воздухе, трития (^3H) в атмосферных осадках приведено на рис. 1. За периоды, когда измерения не проводили, данные восстановлены методом, аналогичным описанному в публикации [6].

При проведении атмосферных ядерных взрывов измерения концентрации радиоактивных продуктов в воздухе и их выпадений из атмосферы на земную поверхность до 1954 г. носили эпизодический характер. По американским оценкам после термоядерного взрыва с мощностью энерговыделения $W = 10,4$ Мт, проведенного 31.10.1952 г. в экваториальной зоне Тихого океана на атолле Эниветок, увеличение радиоактивности атмосферы в целом над северным полушарием в 1952—1953 гг. было

еще сравнительно небольшим. Но уже в 1954 г. среднегодовая (см. рис. 1, а) концентрация ^{137}Cs в воздухе резко увеличилась и составила $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, концентрация $^{90}\text{Sr} \sim 3 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³. Этому способствовал и очередной термоядерный взрыв мощностью 15 Мт, проведенный США 28.02.1954 г. примерно в том же районе на атолле Бикини. Загрязнение тропосферы в том же году вызвала только часть радиоактивных продуктов этого взрыва, поскольку в основном они были заброшены в стратосферу и внесли свой вклад в загрязнение тропосферы в следующем 1955 г., когда 22 ноября на Семипалатинском полигоне был проведен термоядерный взрыв мощностью 1,6 Мт [7]. В 1955 г. среднегодовая концентрация ^{137}Cs и ^{90}Sr в приземной атмосфере возросла до $21 \cdot 10^{-5}$ и $14 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³ соответственно и в последующие годы продолжала увеличиваться в связи с новыми ядерными испытаниями. В 1959 г. наблюдал-



Р и с. 1. Среднегодовая (а) и среднемесячная (б) концентрация ^3H (1) в атмосферных осадках, ^{137}Cs (2), ^{90}Sr (3), суммарная β -активность (4) в воздухе в среднем по СССР (до 1991 г.) и России (после 1991 г.)

ся первый максимум приземной концентрации в воздухе ^{137}Cs и ^{90}Sr ($72 \cdot 10^{-5}$ и $43 \cdot 10^{-5}$ Бк/ м^3 соответственно) после интенсивных ядерных испытаний в США, Великобритании и СССР в предыдущем году, когда было проведено около 20 взрывов, мощность каждого из которых превышала 1 Мт. Наибольшую мощность 8,9 Мт имел взрыв, проведенный США 28.06.1958 г. на атолле Эниветок.

В 1959 г. ядерные испытания не проводили, в 1960 г. было проведено только три маломощных взрыва Францией в пустыне Сахаре в Африке. Поэтому начался процесс естественного самоочищения атмосферы от радиоактивных примесей в результате оседания аэрозолей и их вымывания атмосферными осадками, который продолжался до сентября 1961 г. Концентрация ^{137}Cs и ^{90}Sr в воздухе в 1960 г. уменьшилась до $15 \cdot 10^{-5}$ и $9,2 \cdot 10^{-5}$ Бк/ м^3 соответственно. После серии ядерных взрывов, проведенных СССР в сентябре—ноябре 1961 г. и в августе—декабре 1962 г. на Новой Земле, а также США с июня по октябрь на о-ве Рождества и о-ве Джонстон в Тихом океане, радиоактивное загрязнение атмосферы снова начало быстро возрастать. Максимальных значений оно достигло в следующем 1963 г., когда радиоактивные продукты взрывов начали поступать из стратосферного резервуара в приземную атмосферу. Измерения показали, что концентрация радионуклидов в воздухе и осадках в 1963 г. была самой высокой в минувшем столетии — среднегодовое содержание ^{137}Cs в воздухе составляло $245 \cdot 10^{-5}$ Бк/ м^3 , ^{90}Sr — $142 \cdot 10^{-5}$. Содержание ^3H в осадках достигало 224 Бк/л, что на три порядка (т.е. находилось внутри интервала от 500 до 4999 раз) превышало концентрацию ^3H космогенного происхождения, наблюдавшуюся до начала ядерных испытаний.

В 1963 г. между СССР, США и Великобританией был заключен Московский договор о прекращении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой. В результате радиоактивное загрязнение приземной атмосферы начало убывать из-за постепенного истощения запасов радионуклидов в стратосферном резервуаре, где они накопились от всех предыдущих взрывов мегатонного ранга. Выведение радионуклидов из стратосферы происходило по экспоненте с периодом полувыведения $T = 0,82$ года для ^{137}Cs и ^{90}Sr и 1,2 года для ^3H . Различия в скоростях выведения обусловлены их фракционированием при термоядерном взрыве в процессе подъема огненного шара в стратосфере. Пары ^3H конденсируются в капли на дальней периферии самой вершины огненного шара, где температура снижается до 100°C , тогда как ^{137}Cs и ^{90}Sr конденсируются ниже, ближе к центру огненного шара, где температура значительно выше. Из верхних слоев стратосферы радионуклиды поступают в тропосферу медленнее, чем из нижних.

Радиоактивное загрязнение атмосферы уменьшалось по экспоненциальному закону до 1967 г., когда 17.06.1967 г. был проведен первый в КНР термоядерный взрыв мощностью 3,3 Мт. В 1968 г. взрывы мощностью 2,5 и 1 Мт провела Франция 24 августа и 8 сентября в южном полушарии на атолле Муруроа в Тихом океане, КНР — 27 декабря мощностью 3 Мт в пустыне Гоби вблизи оз. Лобнор. Их регулярно проводили и в последующие годы [8]. После каждого мощного взрыва концентрация ^{137}Cs и ^{90}Sr в приземной атмосфере СССР на следующий год возрастала, затем снова начинала уменьшаться. В среднем после 1968 г. все же происходило общее снижение, наблюдающееся на фоне больших колебаний, что объясняется общим превышением скорости самоочищения атмосферы над скоростью поступления в нее радиоактивных продуктов новых ядерных испытаний. В отличие от концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr в воздухе содержание ^3H в осадках уменьшалось медленнее, колебания этой концентрации были меньше, а кажущийся период полувыведения ^3H из атмосферы в 1968—1973 гг. повысился и составлял 2,4 года. После прекращения термоядерных взрывов в атмосфере в 1980 г.

снижение концентрации ^3H в осадках в дальнейшем происходило еще медленнее. Причина замедленного по сравнению с ^{137}Cs и ^{90}Sr выведения ^3H из атмосферы — частичная компенсация ее самоочищения вторичным поступлением ^3H в воздух вследствие испарения влаги с поверхности планеты. Результирующее убывание концентрации ^3H в последние 20 лет происходит с периодом полууменьшения 11 лет, т.е. фактически обусловлено радиоактивным распадом его запасов.

В результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. произошел резкий скачок средневзвешенной по территории страны концентрации ^{137}Cs , которая примерно достигла максимального уровня, наблюдавшегося в 1963 г. В расчетах из усреднения были исключены данные, относившиеся к 30-км зоне.

В продуктах ядерных взрывов отношение концентрации $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr} \sim 1,7$, в продуктах аварии на Чернобыльской АЭС ~ 10 , поэтому на рис. 1, а можно заметить, что концентрация ^{90}Sr в приземной атмосфере в среднем по СССР после аварии возросла значительно меньше, чем ^{137}Cs . На среднегодовом содержании ^3H в воде осадков эта авария вообще не сказалась. После аварии территория СССР была загрязнена неравномерно (см. таблицу). К загрязненной зоне условно отнесены пункты отбора проб радиоактивных аэрозолей, расположенные на расстоянии от 150 до 400 км от места аварии, — Минск, Курск, Барышевка (около аэропорта Киева), Брянск, Курчатов, к региону Крайнего Севера европейской территории страны — о-в Хейса на Земле Франца-Иосифа и мыс Желания на Новой Земле. Из таблицы видно, что концентрация ^{137}Cs и ^{90}Sr в разных регионах лежит в пределах разброса, составляющего пять порядков (т.е. внутри интервала от $5 \cdot 10^4$ до $4,9 \cdot 10^5$). Большие различия отношения $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ для разных регионов обусловлены переносом в эти регионы радионуклидов из засыпаемого дымящего реактора с 26 апреля по 6 мая. В этот период выход в атмосферу более летучего ^{137}Cs постепенно стал сильно преобладать над выходом нелетучего ^{90}Sr . Стратосферные запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr к моменту аварии истощились, и стал заметен вклад ветрового подъема радиоактивной пыли глобального происхождения с загрязненной к тому времени поверхности суши в общее радиоактивное загрязнение атмосферы [10]. При тепловом взрыве реактора Чернобыльской АЭС продукты аварии не достигли стратосферы, поэтому период их полувыведения из тропосферы составлял ~ 1 мес, после чего ветровой подъем радиоактивной пыли с подстилающей поверхности стал определяющим фактором в загрязнении атмосферы. При выпадениях радионуклидов из атмосферы на почву вначале загрязняется ее верхний пылящий слой, но постепенно с годами радионуклиды мигрируют под действием природных факторов вниз по вертикальному почвенному профилю [11], значит, ослабевает и их вторичная ветровая миграция с поверхности суши в атмосферу. Поэтому концентрация ^{137}Cs и ^{90}Sr в приземной атмосфере в последнее десятилетие убывала быстрее, чем концентрация ^3H в осадках, поскольку вследствие естественного круговорота воды в природе баланс влаги в атмосфере поддерживается на примерно постоянном уровне [12].

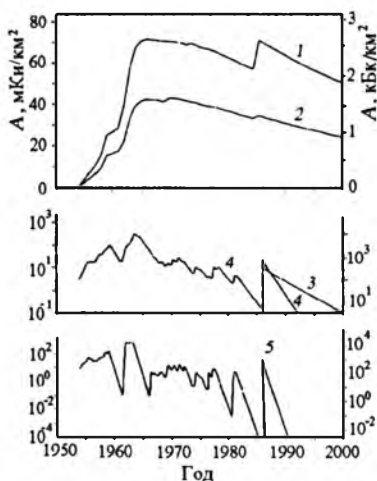
На рис. 1, б показано изменение со временем среднемесячной концентрации суммарной β -активности долгоживущих радионуклидов в приземной атмосфере по результатам измерений через 4 сут после окончания отбора каждой суточной пробы атмосферной пыли, когда короткоживущие продукты природных ^{222}Rn и ^{220}Rn уже распались. До 1982 г. ежегодно в конце весны — начале лета наблюдался максимум концентрации суммарной β -активности, связанный со временем сезонной перестройки высоты тропопаузы — слоя температурного градиента, разделяющего стратосферу и тропосферу и затрудняющего обмен между ними. Весной под действием солнечного

Среднегодовая концентрация ^{137}Cs , ^{90}Sr в воздухе отдельных регионов СССР, наблюдавшаяся в 1986 г. (10^{-5} Бк/м³), и их отношения [2]

Место наблюдения	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$
Выброс реактора, 10^{15} Бк [9]	70—85	8	~ 10
Чернобыль	~ 10^3	~ 10^2	~ 10
Загрязненная зона	$2,5 \cdot 10^3$	125	20
Юг европейской территории	$2,3 \cdot 10^3$	19	120
Закавказье	873	7,73	113
Центр европейской территории	191	3,35	57
Прибалтика	61,8	1,08	57
Юг Восточной Сибири	50,0	0,34	147
Казахстан и Средняя Азия	42,2	0,37	114
Западная Сибирь	26,6	0,34	78
Север Восточной Сибири	13,7	0,19	72
Север европейской территории	7,51	0,20	38
Заполярье	5,4	0,30	18
Крайний Север европейской территории	1,01	0,05	21

излучения более низко расположенная зимняя тропопауза разрушается, старый слой температурного градиента размывается и взамен его образуется новая летняя тропопауза на большей высоте. Часть радиоактивных продуктов, находившихся в нижней стратосфере, при этом оказывается уже в верхней тропосфере, откуда сравнительно быстро ~ 1 мес поступает к поверхности земли. Более узкие пики на рис. 1, б объясняются тропосферным переносом продуктов ядерных испытаний. Последнее ядерное испытание в атмосфере было проведено в 1980 г. На следующий год еще наблюдался отчетливо выраженный годовой ход концентрации суммарной β -активности в приземной атмосфере, но в последующие годы картина годового хода становится выраженной слабо или вообще исчезает. После аварии на Чернобыльской АЭС, которой соответствует узкий и высокий пик концентрации суммарной β -активности, годовой ход этой величины либо не наблюдался, либо заменялся другим с максимумом в период наибольшего ветрового подъема радиоактивной пыли с поверхности суши в северном полушарии. Аналогичный годовой ход характерен и для концентрации долгоживущего ^{137}Cs в приземной атмосфере в отличие от выпадений ^3H с осадками, где всегда наблюдалась четкая картина годового хода. Это объясняется тем, что на сезонный ход концентрации ^3H в осадках накладывался сезонный ход месячного количества выпадающих атмосферных осадков, максимум которого в средних широтах приходится на середину лета, а на юге Средней Азии, наоборот, зимой. Изменение со временем выпадений радионуклидов из атмосферы аналогично изменению их концентрации в воздухе и здесь не рассматривается.

Суммирование выпадений радионуклида на землю с учетом его радиоактивного распада позволяет рассчитать динамику плотности загрязнения земной поверхности. На рис. 2 в линейном масштабе приведена картина накопления на почве долгоживущих ^{137}Cs и ^{90}Sr , рассчитанная по их годовым выпадениям, в логарифмическом масштабе — накопление более короткоживущих ^{134}Cs , ^{144}Ce и $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$, рассчитанное по их месячным выпадениям. Для ^{137}Cs и ^{90}Sr хорошо виден быстрый рост кривых накопления на почве в 1954—1963 гг. вследствие ядерных испытаний, интенсивно проводившихся в 1952—1962 гг. Затем рост загрязнения почвы существенно замедлился, в



Р и с. 2. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs (1), ^{90}Sr (2), ^{134}Cs (3), ^{144}Ce (4), $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$ (5) в среднем по СССР (до 1991 г.) и России (после 1991 г.)

При построении кривых на рис. 2 использовали годовые выпадения радионуклидов, поэтому рост плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в 1986 г. на этом рисунке более пологий, чем в действительности. Подробная картина для отдельных населенных пунктов показывает, что наиболее быстрый рост радиоактивного загрязнения почвы наблюдался в течение первых 10 сут после аварии, в дальнейшем темпы роста уменьшались, в июне загрязнение почвы ^{137}Cs почти сформировалось. Повышенные выпадения ^{137}Cs из атмосферы сохранялись до конца 1986 г., наблюдались они и в следующем 1987 г. вследствие ветрового выноса радиоактивной пыли из загрязненной при аварии зоны, но их вклад в накопление ^{137}Cs на почве был невелик. Содержание ^{90}Sr в продуктах аварии на Чернобыльской АЭС было примерно в 10 раз меньше, чем ^{137}Cs , поэтому загрязнение почвы ^{90}Sr при усреднении по территории всей страны мало изменилось. В остальном его накопление на почве с 1954 г. происходило так же, как и ^{137}Cs .

Динамика накопления на почве ^{134}Cs показывает, что в 1986 г. оно было максимальным ($\sim 0,3 \text{ kBq/m}^2$), затем быстро убывало в соответствии с периодом полураспада 2,06 года. До аварии ^{134}Cs в объектах природной среды не было. Накопление на почве более короткоживущих ^{144}Ce и $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$ в отличие от ^{137}Cs и ^{90}Sr характеризуется большой изменчивостью. Их содержание в продуктах ядерных испытаний значительно выше, но они распадаются быстрее, и почва быстрее очищается от них. Поэтому каждый новый взрыв приводил к существенному загрязнению поверхности почвы короткоживущими радионуклидами. В то же время дополнительное загрязнение почвы долгоживущими продуктами каждого нового испытания было малозаметным на фоне загрязнения, накопившегося от предыдущих ядерных взрывов. Период полураспада ^{144}Ce (284 сут) значительно больше, чем ^{95}Zr (64 сут), поэтому изменчивость его накопления на почве меньше, чем $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$ (см. рис. 2). Максимальное накопление на почве ^{144}Ce наблюдалось в конце 1963 г. и составляло в среднем по СССР $\sim 10 \text{ kBq/m}^2$. В последующие годы максимальная плотность загрязнения почвы ^{144}Ce вследствие проведения китайских ядерных взрывов отмечалась в 1972 г. и была

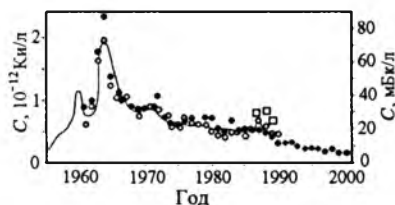
1966 г. наблюдалось максимальное загрязнение почвы ^{137}Cs — $2,6 \text{ kBq/m}^2$ и ^{90}Sr — $1,6 \text{ kBq/m}^2$, чему соответствуют 71 мКи/км^2 и 43 мКи/км^2 . Эти расчетные данные совпадают с данными широкомасштабных экспедиционных обследований территории СССР. Выпадения радиоактивных продуктов ядерных взрывов в КНР, начавшиеся с 1964 г., не изменили общей тенденции к постепенному уменьшению плотности загрязнения почвы вследствие радиоактивного распада ^{137}Cs и ^{90}Sr . Но авария на Чернобыльской АЭС привела к резкому росту загрязнения почвы ^{137}Cs , которое в среднем по СССР достигло уровня 1963 г. В расчетах из усреднения исключена 30-км зона. Приведенное усреднение по всей территории СССР условно, поскольку основная часть ^{137}Cs при аварии осела на почву на европейской части территории СССР, на азиатской доля ^{137}Cs аварийного происхождения колебалась от 2 до 10% [13].

почти в 10 раз меньше. Примерно такой же она была и в мае 1986 г., сразу после аварии на Чернобыльской АЭС. Максимальное накопление $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$ на почве наблюдалось в 1962 г. — начале 1963 г. ($\sim 25 \text{ кБк/м}^2$). Это в 20 раз больше, чем максимальное загрязнение почвы в мае 1986 г. после аварии на Чернобыльской АЭС, и в 70 раз больше максимальных значений, наблюдавшихся при проведении ядерных испытаний в КНР в 1969—1972 гг. Перед аварией на Чернобыльской АЭС глобальное загрязнение почвы ^{144}Ce и $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$ не было заметно, после аварии почва сравнительно быстро очистилась от них в результате радиоактивного распада.

Изменение среднегодовой концентрации ^{90}Sr в реках СССР и России, усредненной по территории всей страны [14], приведено на рис. 3. До 1961 г. концентрацию ^{90}Sr в реках СССР не измеряли, поэтому за более ранние годы картина дополнена расчетными данными [15]. Несмотря на объединение данных по разнородным рекам, наблюдается удовлетворительное совпадение натурных данных с расчетными. Наибольшее расхождение усредненных данных отмечается для первых лет наблюдений, когда число контролируемых рек и число пунктов на них было меньше. Первый максимум концентрации ^{90}Sr в речных водах СССР (42 мБк/л) наблюдался в 1960 г., через 2 года после серии мощных взрывов, проведенных в 1958 г. Второй максимум концентрации ^{90}Sr в реках СССР (71 мБк/л) наблюдался в 1964 г., тоже через 2 года после окончания серии мощных ядерных испытаний 1961—1962 гг. Поскольку они были проведены на Новой Земле, содержание ^{90}Sr в воде северных рек, входящих в состав России, оказалось больше, чем в среднем по СССР, и соответствующая точка для рек России на рис. 3 расположилась выше. Проводившиеся в последующие годы китайские ядерные испытания не оказывали существенного влияния на концентрацию ^{90}Sr в воде рек СССР. В 1965—1967 гг. она резко снизилась, до 1985 г. наблюдалось ее медленное уменьшение, продолжавшееся до 17—18 мБк/л. Авария на Чернобыльской АЭС привела к незначительному увеличению в 1987 г. концентрации ^{90}Sr в воде рек СССР, если исключить из усреднения Днепр, который протекает через зону, загрязненную при аварии. Если же в усреднение включить и Днепр, то средняя по СССР концентрация возрастает почти в 2 раза и достигает максимальной в 1988 г. ($\sim 30 \text{ мБк/л}$), когда вклад смыва ^{90}Sr с загрязненной почвы водосбора увеличился. В это время выпадения ^{90}Sr из атмосферы были уже малы, его содержание в почве, следовательно, и смыв после аварии почти не уменьшились.

После распада СССР объем наблюдений за концентрацией ^{90}Sr в реках сократился, что уменьшает представительность усредненной по территории страны концентрации ^{90}Sr в речной воде и приводит к несопоставимости результатов наблюдений, проводившихся в разные годы. Можно только сделать качественный вывод о продолжающемся в последнее десятилетие уменьшении концентрации ^{90}Sr в воде рек России, которая к 2000 г. снизилась до 6 мБк/л.

Содержание ^{90}Sr в воде крупных озер СССР различалось в зависимости от их географического положения [14]. До начала проведения ядерных испытаний в КНР концентрация ^{90}Sr в воде всех озер была примерно одинаковой и колебалась в 1961—1963 гг. в пределах 52—67 мБк/л. В дальнейшем эта концентрация в воде северных озер в целом медленно убывала, уменьшившись к концу века примерно в 10 раз. В



Р и с. 3. Среднегодовая концентрация ^{90}Sr в реках: $\circ$ — СССР (после 1985 г. без Днепра); $\square$ — то же с Днепром; $\bullet$ — Россия, — — — расчет [15]

отличие от этого в пограничном с КНР оз. Ханка концентрация ^{90}Sr резко увеличилась при первом же китайском ядерном испытании мощностью 22 кт, проведенном 16.10.1964 г., и достигла 174 мБк/л. Следующий взрыв 14.05.1965 г. мощностью 40 кт привел к ее возрастанию до 206 мБк/л. Радиоактивные продукты испытаний, распространяясь в атмосфере по ветру от полигона возле оз. Лобнор, проходили над оз. Ханка, что и вызывало загрязнение его вод. В 1966 г. на этом полигоне было проведено три взрыва: 9 мая мощностью 250 кт, 27 октября — 12 кт и 28 декабря — 122 кт. Хотя траектории распространения продуктов испытаний проходили через Приморье [8], концентрация ^{90}Sr в оз. Ханка немного уменьшилась, хотя и оставалась высокой (182 мБк/л). Такое поведение ^{90}Sr обусловлено тем, что продукты взрывов малой мощности поднимались в атмосферу на сравнительно небольшую высоту и интенсивно выпадали вдоль траектории распространения в районе оз. Ханка, взрывы промежуточной мощности забрасывали радиоактивные продукты на большую высоту, поэтому выпадения ^{90}Sr на акваторию оз. Ханка были меньше. Сравнительно небольшая концентрация ^{90}Sr в воде этого озера наблюдалась после взрывов мегатонного ранга, проводившихся в КНР, когда основная часть продуктов взрывов инжектировалась в стратосферу. Наоборот, самая высокая концентрация ^{90}Sr (218 мБк/л) в оз. Ханка наблюдалась при взрыве малой мощности — 15 кт, проведенном 18.11.1971 г. на башне высотой 102 м.

В отличие от рек и проточных водоемов радиоактивное загрязнение морей чаще всего было обусловлено выпадениями ^{90}Sr из атмосферы на акваторию [15], а не смывом с поверхности почвы. В частности, это наблюдалось в зонах застоя океанических вод, ограниченных морскими течениями, проходящими по их периферии, например, в Саргассовом море Северной Атлантики. Измеренная концентрация ^{90}Sr в морской воде соответствующих зон Атлантического, Индийского и Тихого океанов совпадает с теоретическими расчетами динамики их загрязнения, базирующимися на измерениях выпадений ^{90}Sr из атмосферы [16, 17]. Для морей, омывающих берега континента, такие расчеты не проводили ввиду трудностей, возникающих при оценке интенсивности процессов обмена с океаническими водами (вклад стока ^{90}Sr по рекам в загрязнение внешних морей обычно невелик). Для внутренних морей, таких, как Аральское, основную роль в формировании загрязнения морской воды ^{90}Sr играет его поступление с речной водой и испарение влаги с поверхности акватории. В Аральском море концентрация ^{90}Sr — самая высокая из всех морей СССР, на следующем месте — мелкое Азовское море, отделенное от Черного моря узким Керченским проливом.

В 1985 г. среднегодовая концентрация ^{90}Sr в поверхностных морских водах составляла, мБк/л: Аральское 155, Азовское 32, Балтийское 20, Каспийское и Черное 16, Белое 13, Баренцево 11, Японское 6, Охотское и Тихий океан у Камчатки 4 [18]. Авария на Чернобыльской АЭС мало повлияла на среднюю по морю концентрацию ^{90}Sr в воде. Следует отметить более низкое содержание ^{90}Sr в морской воде по сравнению с речной и его меньшую изменчивость со временем.

Таким образом, системой радиационного мониторинга Гидрометслужбы на территории СССР были охвачены все основные объекты природной среды: воздух, почва и природные воды. Максимальное радиоактивное загрязнение приземного воздуха и атмосферных выпадений наблюдалось в 1963 г. после серии мощных термоядерных взрывов, проведенных в 1961—1962 гг. СССР на Новой Земле и в 1962 г. США в Тихом океане. Средняя по стране концентрация ^{137}Cs в воздухе в 1963 г. составляла $245 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, ^{90}Sr — $142 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, ^3H в атмосферных осадках — 224 Бк/л.

Максимальная концентрация ^{90}Sr 71 мБк/л в речных водах СССР наблюдалась в 1964 г., максимальная плотность загрязнения почвы ^{137}Cs 2,6 кБк/м² и ^{90}Sr 1,6 кБк/м² — в 1966 г. В результате аварии на Чернобыльской АЭС концентрация в воздухе ^{137}Cs , средневзвешенная по территории СССР (без 30-км зоны), на небольшое время в 1986 г. достигла максимума, наблюдавшегося в 1963 г. после серии ядерных испытаний, плотность загрязнения почвы этим радионуклидом в среднем по стране тоже достигла уровня 1963 г. Загрязнение почвы ^{90}Sr увеличилось незначительно, как и его средняя концентрация в речных водах СССР.

До сих пор продолжает сказываться влияние атмосферных ядерных испытаний на радиоактивное загрязнение воздуха, воды и почвы долгоживущими радионуклидами. В последние годы основной вклад в содержание техногенных радионуклидов в воздухе и речной воде вносит их поступление из почвы, где они накопились за счет глобальных выпадений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1999 г. Ежегодник. Под ред. К.П. Махонько. СПб.: Гидрометеиздат, 2000.
2. Радиоактивное загрязнение территории СССР в 1986 г. Ежегодник. Под ред. К.П. Махонько. Обнинск, НПО «Тайфун», 1987.
3. Махонько К.П., Козлова Е.Г., Волокитин А.А. Динамика накопления радиойода на почве и реконструкция доз от его излучения на территории, загрязненной после Чернобыльской аварии. — Радиация и риск, 1996, вып. 7, с. 140—191.
4. Махонько К.П., Козлова Е.Г., Волокитин А.А. Динамика накопления радиойода на почве и реконструкция доз от его излучения на территории, загрязненной после аварии на Чернобыльской АЭС. Изменения в статье, опубликованной в «Радиация и риск», 1996, вып. 7, с. 140—191. — Радиация и риск, 1997, вып. 9, с. 111.
5. Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС. Под ред. К.П. Махонько. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 264 с.
6. Махонько К.П., Авраменко А.С., Силантьев А.Н. и др. Накопление на почве стронция-90, цезия-137, церия-144 и циркония с плутоном-95 в среднем по СССР. — Труды ИЭМ, 1977, вып. 6(64), с. 56—60.
7. Ядерные испытания СССР. Под ред. В.Н. Михайлова. М.: ИздАт, 1997. 304 с.
8. Махонько К.П., Павлова Л.Н. Радиоактивные продукты в атмосфере СССР от китайских ядерных взрывов. СПб.: Гидрометеиздат, 2001.
9. Алексашин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. Под ред. Л.А. Ильина, В.А. Губанова. М.: ИздАт, 2001. 752 с.
10. Махонько К.П. Влияние ветрового подъема радиоактивной пыли с поверхности почвы на загрязнение атмосферы над территорией России. — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 6, с. 458—464.
11. Махонько К.П. Вид профилей концентрации продуктов деления в почве при глобальных и локальных выпадениях. — В кн.: Радиоактивные изотопы в почвах и растениях. Л.: Колос, 1969, с. 48—56.
12. Махонько К.П., Ким В.М., Катрич И.Ю., Волокитин А.А. Сравнительное поведение трития и ^{137}Cs в атмосфере. — Атомная энергия, 1998, т. 85, вып. 4, с. 313—318.
13. Махонько К.П., Работникова Ф.А., Волокитин А.А. Оценка загрязнения почвы ^{137}Cs на территории СССР в 1988 г. — Там же, 1990, т. 68, вып. 4, с. 262—264.
14. Махонько К.П., Чумичев В.Б., Ким В.М. и др. Ретроспектива техногенного радиоактивного загрязнения объектов природной среды в 20-м веке на территории СССР и России. — В кн.: Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2000 г. Ежегодник. Под ред. К.П. Махонько. СПб.: Гидрометеиздат, 2001, с. 40—56.
15. Махонько К.П. Расчет концентраций глобальных атмосферных примесей в реках и замкнутых водоемах. — Метеорология и гидрология, 1980, № 8, с. 82—89.
16. Махонько К.П. Расчет загрязнения поверхностных вод центрального района Северной Атлантики атмосферными выпадениями стронция-90. — Там же, 1979, № 3, с. 67—72.
17. Махонько К.П. Расчет загрязнения поверхностных вод некоторых районов Мирового океана атмосферными выпадениями стронция-90. — Там же, 1980, № 4, с. 73—78.
18. Радиоактивное загрязнение территории СССР в 1985 г. Ежегодник. Под ред. К.П. Махонько. Обнинск, НПО «Тайфун», 1986.