

## ОБЗОРЫ

УДК 621.039.586

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЙОДА В АТМОСФЕРЕ ПОСЛЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АВАРИИ

Огородников Б.И.

При чернобыльской аварии 1986 г. в атмосферу было выброшено около 670 ПБк  $^{131}\text{I}$ , а также  $^{129}, 132, 133, 135\text{I}$  [1–3]. Наряду с другими продуктами этой аварии распространение радиоиода в Северном полушарии происходило как в западном, так и в восточном направлениях.

К сожалению, региональные наблюдения за радиоактивными продуктами чернобыльского выброса проходили фрагментарно, без согласованных планов, интеркалиброванных методик и оперативного обмена информацией. Все это свидетельствовало о неготовности служб радиационного контроля многих стран к мониторингу в случае серьезной аварии на ядерном объекте и трансграничного переноса радиоактивных веществ. В большинстве стран пробоотбор был выполнен с помощью фильтрующих материалов, улавливающих только аэрозоли, хотя газообразные компоненты выброса иногда на порядок превышали аэрозольные. Тем не менее даже

опубликованные результаты мозаичных наблюдений позволяют оценить картину поведения и распространения чернобыльского радиоиода в Северном полушарии.

Интерес с радиоиодом определяется тем, что его вклад в радиационные дозовые нагрузки, особенно в первые дни после аварии, оказался наиболее существенным. Отражением этого стали возрастающие с начала 90-х годов случаи заболеваний детей раком щитовидной железы в Беларуси, на Украине и в России.

Данный обзор состоит из трех частей, посвященных анализу и обобщению данных об атмосферных концентрациях радиоиода, соотношению аэрозольных и газообразных компонентов, дисперсности аэрозолей и о дозах, обусловленных поступлением  $^{131}\text{I}$  в организм человека.

#### Часть I. Временные и пространственные изменения концентрации

##### *Радиоид на территории бывшего СССР*

Первые пробы радиоактивных аэрозолей были отобраны над Чернобыльской атомной электростанцией (ЧАЭС) во второй половине дня 27 апреля 1986 г. с помощью фильтрующих материалов ФПА-15-2,0, размещенных в специальных гондолах самолета-лаборатории Ан-24РР Госкомгидромета СССР Министерства обороны [4,5]. В момент отбора на высоте 200 м от развода реактора концентрация аэрозолей  $^{131}\text{I}$  составляла  $7,3 \cdot 10^5$  Бк/м<sup>3</sup> [6]. Результаты последующих полетов и пробоотборов над ЧАЭС в апреле-мае 1986 г. представлены на рис. 1. Максимальная концентрация аэрозолей  $^{131}\text{I}$  ( $8,65 \text{ МБк}/\text{м}^3$ ) была зафиксирована 3 мая.

После завершения острой фазы аварии для исследования состава и концентраций не только аэрозольных, но и газообразных продуктов над развалом IV блока ЧАЭС 8–19 мая 1986 г. были выполнены дополнительные полеты с примене-

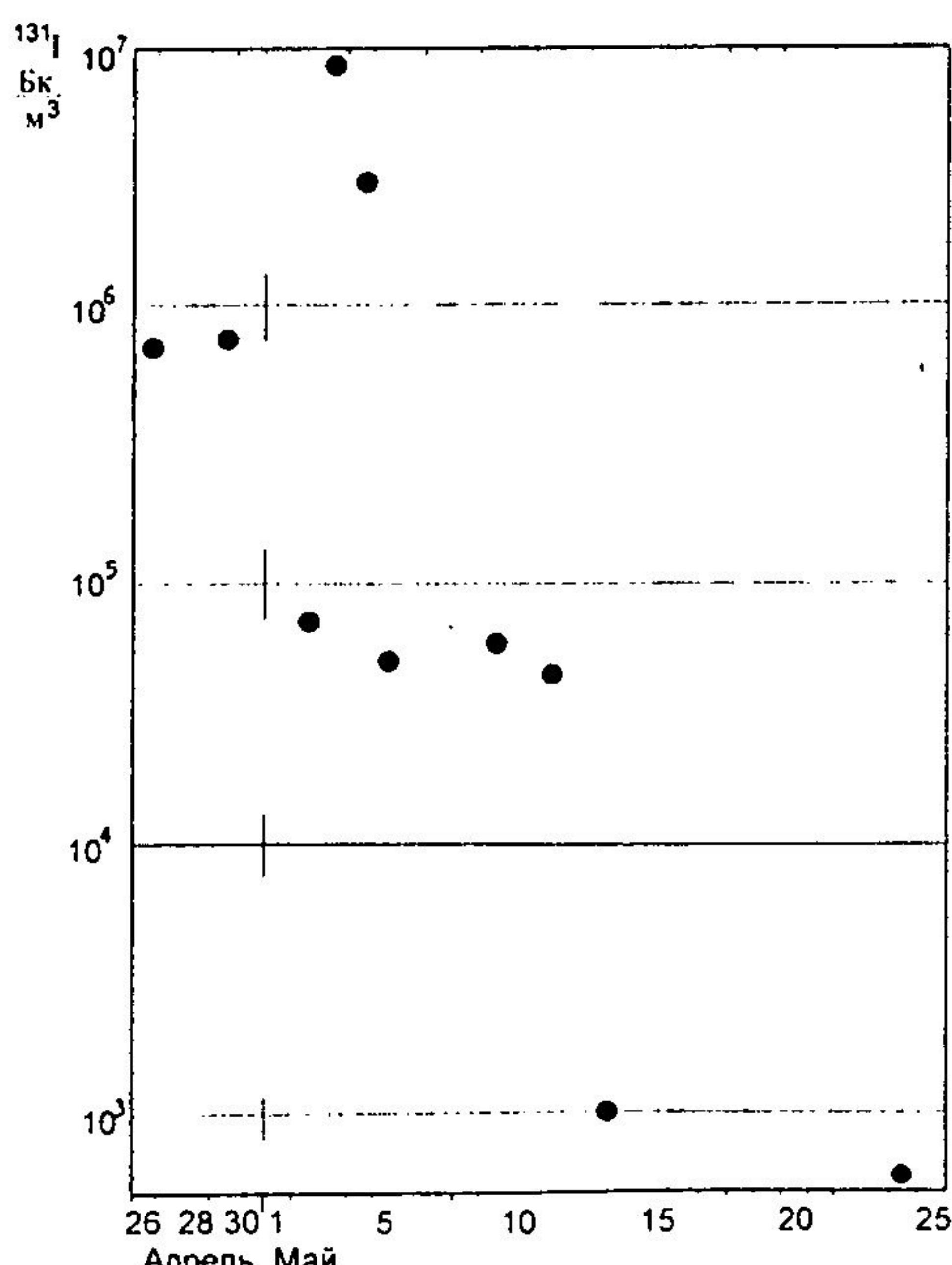


Рис. 1. Концентрации аэрозолей  $^{131}\text{I}$  на высоте 200 м от развода реактора IV блока ЧАЭС в апреле-мае 1986 г.

нием многослойных фильтрующих и сорбционно-фильтрующих материалов (СФМ-И), размещавшихся в гондолах самолета-лаборатории Ан-24РР. Продолжительность отбора варьировали от 1 мин до 1 ч.

Использованные при этом опытные образцы СФМ-И, разработанных в НИФХИ им. Л. Я. Карпова, состоят из двух сорбционных слоев, прикрытых сверху и снизу материалом ФПП-70-0,2, и фильтрующего слоя ФПП-15-1,5, расположенного впереди сорбционных слоев. В свою очередь, каждый из сорбционных слоев выполнен из материала ФПП-70-0,3, на волокна которого нанесен мелкоизмельченный уголь ОУ-А, импрегнированный азотнокислым серебром.

При отборе проб 8 и 15 мая самолет совершал галсы над развалом IV блока на высоте также около 200 м. В остальные дни отбор проходил примерно в 300 м от земли. Открытие и закрытие гондол проводили над ЧАЭС при строго фиксированных времени и местоположении самолета.

Наибольшее значение суммарной концентрации аэрозолей, содержащих  $\gamma$ -излучающие радионуклиды, было зарегистрировано 8 мая ( $11,46 \text{ кБк}/\text{м}^3$ ). В пробе преобладали  $^{131}\text{I}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  и  $^{132}\text{Te}$ , концентрации которых составляли соответственно 5030, 3700 и  $690 \text{ Бк}/\text{м}^3$ . Эти же легколетучие радионуклиды преобладали в пробе, взятой 19 мая. В остальные дни основной вклад в суммарное  $\gamma$ -излучение проб вносили тугоплавкие радионуклиды  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{141}, 144\text{Ce}$  [7].

Несомненную важность представляли результаты одновременных определений концентраций и физико-химических характеристик радиоиода над развалом реактора и в дальней зоне. Для этого 14–19 мая с помощью материала СФМ-И с борта самолета Ан-24 на высоте около 300 м были отобраны пробы радиоактивных газоаэрозольных продуктов к северу и северо-востоку от ЧАЭС (Украина, Белоруссия, Брянская и Смоленская области России). Продолжительность отбора составляла 1,5–4 ч.

В пробах были идентифицированы  $\gamma$ -излучающие нуклиды, характерные для продуктов аварии IV блока; 14 мая выявлен также космогенный  $^7\text{Be}$ . Суммарные концентрации  $\gamma$ -излучателей составляли  $3–31 \text{ Бк}/\text{м}^3$  [6]. Наибольшие содержания  $^{131}\text{I}$  –  $1,5$  и  $1,7 \text{ Бк}/\text{м}^3$  – наблюдали 16 и 17 мая (табл. 1). Присутствие  $^{132}\text{Te}$  отмечено только 14 мая. Проба от 19 мая отличалась наибольшим вкладом  $^{131}\text{I}$  и  $^{103}\text{Ru}$  (26% и 23%) в суммарное  $\gamma$ -излучение.

Таблица 1. Суммарные концентрации  $^{131}\text{I}$  над развалом реактора ЧАЭС и в дальней зоне в мае 1986 г.,  $\text{Бк}/\text{м}^3$  [6]

Дата. май 1986 г.	8	14	15	16	17	19
Над развалом	5030	160	1,5	350	17	136
Дальняя зона	–	0.34	–	1,5	1,7	0,82

Распределение уловленных радионуклидов по слоям материалов СФМ-И показало, что все они за исключением  $^{131}\text{I}$ ,  $^{103}\text{Ru}$  и  $^{106}\text{Ru}$  практически полностью аккумулировались в лобовом слое, т.е. присутствовали в виде аэрозолей.

Известно, что в течение двух суток чернобыльской аварии 1986 г. преимущественный вынос радиоактивных аэрозолей и газов в нижней тропосфере происходил в северо-западном и западном направлениях [3]. На ряде станций радиационного мониторинга, проводящих систематические измерения, вскоре после аварии было отмечено увеличение мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения (МЭД) и поступление на фильтры «свежих» радиоактивных веществ. По наблюдениям на метеостанциях Госкомгидромета СССР в Березине (411 км северо-западнее Чернобыля) и Барышевке (144 км юго-восточнее), продукты аварии IV блока ЧАЭС начали фиксировать с 26 апреля [8]. Пробы отбирали на фильтрующие материалы ФПП-15-1,7, улавливавшие только аэрозоли. Максимальные концентрации  $^{131}\text{I}$  наблюдали в Березине 28 апреля ( $407 \text{ Бк}/\text{м}^3$ ), а в Барышевке 30 апреля ( $310 \text{ Бк}/\text{м}^3$ ). Затем концентрации упали на 3 порядка величины (рис. 2). В пос. Прейла, находящемся в 750 км северо-западнее ЧАЭС на побережье Балтийского моря близ Клайпеды,

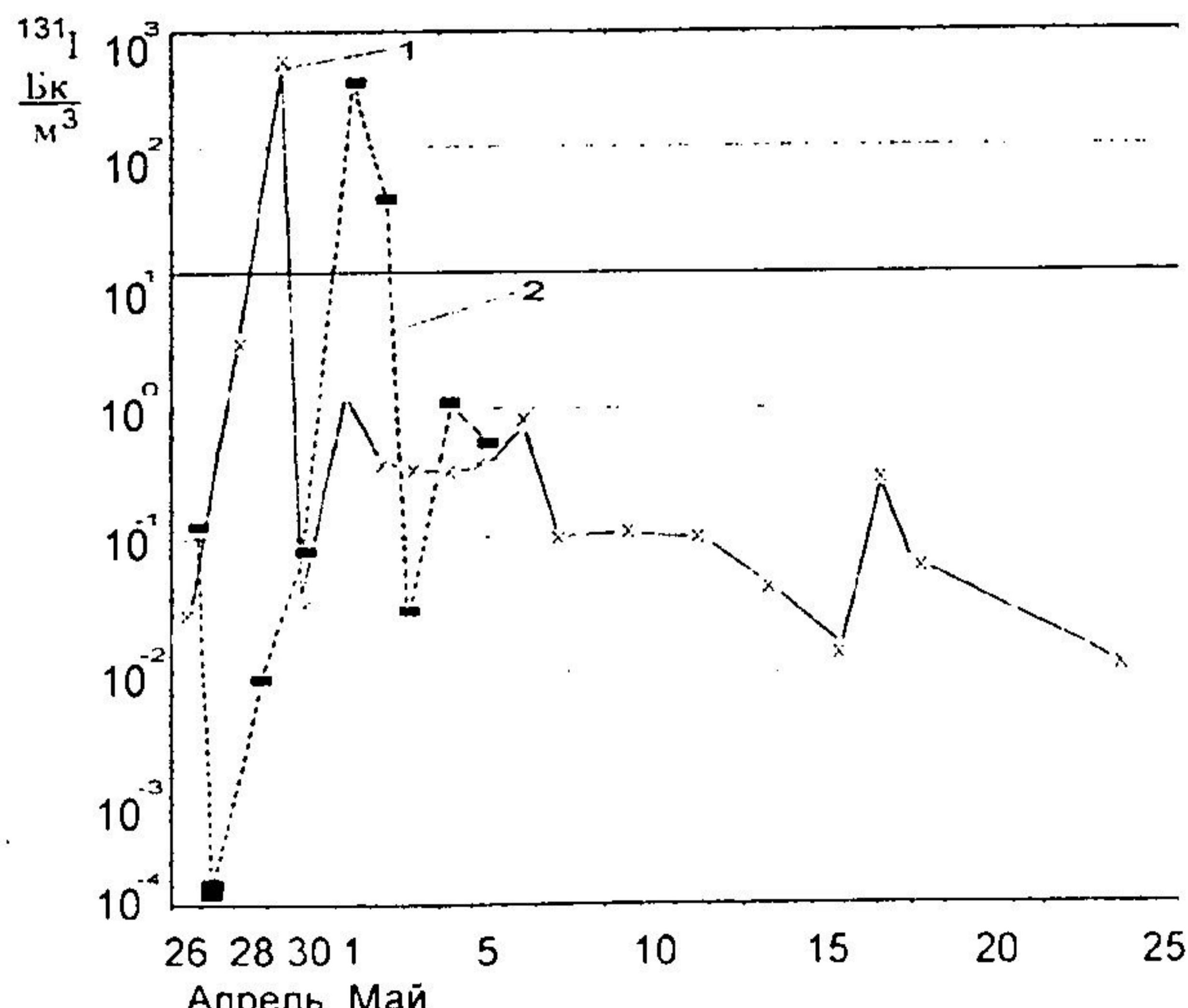


Рис. 2. Концентрации аэрозолей  $^{131}\text{I}$  в апреле-мае 1986 г. в Березине (1) и Барышевке (2) [8]

27–28 апреля концентрация аэрозолей  $^{131}\text{I}$  достигала 120 Бк/м<sup>3</sup> [9]. На следующие сутки она очень незначительно уменьшилась – до 96 Бк/м<sup>3</sup>. В Вильнюсе, расположенным в 500 км от Чернобыля также в северо-западном направлении, 28–29 апреля были зафиксированы аэрозоли радиоиода и других продуктов аварии; концентрация  $^{131}\text{I}$  достигала 45 Бк/м<sup>3</sup> [9]. Интересно, что в это же время близ Игналинской АЭС, где находится Геофизическая станция этого института, расположенная всего в 70 км к северо-востоку от Вильнюса, концентрация аэрозолей  $^{131}\text{I}$  была в 6 раз ниже, но наибольшей за весь поставарийный период наблюдений [10].

#### *Радиоид в Европе*

В Швеции, Германии, Словакии, Чехии, Венгрии, Финляндии и Польше первые поступления радионуклидов чернобыльского выброса были зарегистрированы 28–30 апреля [11–25]. Под Стокгольмом (в 1150 км северо-западнее ЧАЭС) в течение двух дней, 28 и 29 апреля, концентрации аэрозолей  $^{131}\text{I}$  удерживались на уровне 6–12 Бк/м<sup>3</sup> [25]. В западном направлении концентрации радиоиода оказались несколько ниже. В Варшаве (в 600 км западнее ЧАЭС) максимум концентраций аэрозолей  $^{131}\text{I}$  был отмечен 29 апреля и составлял 15 Бк/м<sup>3</sup>. В это же время в Кракове (в 700 км западнее ЧАЭС) зафиксирована величина вдвое выше [23,24]. В окрестностях Мюнхена отбор суммарных газоаэрозольных компонентов радиоиода проводили одновременно в Институте радиационной гигиены [12] и Институте радиационной защиты [13]. Максимальные концентрации  $^{131}\text{I}$  (около 50 Бк/м<sup>3</sup>) наблюдали во второй половине дня 30 апреля и 1 мая. В течение последующих двух недель они уменьшились на 3 порядка величины. Поскольку пункты пробоотбора находились друг от друга на расстоянии всего около 10 км, концентрации радиоиода в них практически совпадали. В пробах Института радиационной защиты на протяжении первых четырех дней детектировали еще  $^{133}\text{I}$ . Его концентрации были на порядок ниже, чем  $^{131}\text{I}$ , но динамика изменений (с учетом радиоактивного распада) практически совпадала с  $^{131}\text{I}$  (рис. 3).

В Европе наиболее продолжительные наблюдения за содержанием  $^{131}\text{I}$  в атмосфере были выполнены в Варшаве Центральной лабораторией радиологической защиты [26]. С 28 апреля до 20 июня 1986 г. было отобрано 39 проб. Прокачку воздуха с линейной скоростью 8 см/с проводили через четырехслойный пакет фильтров площадью 113 см<sup>2</sup>. В первом слое из волокни-

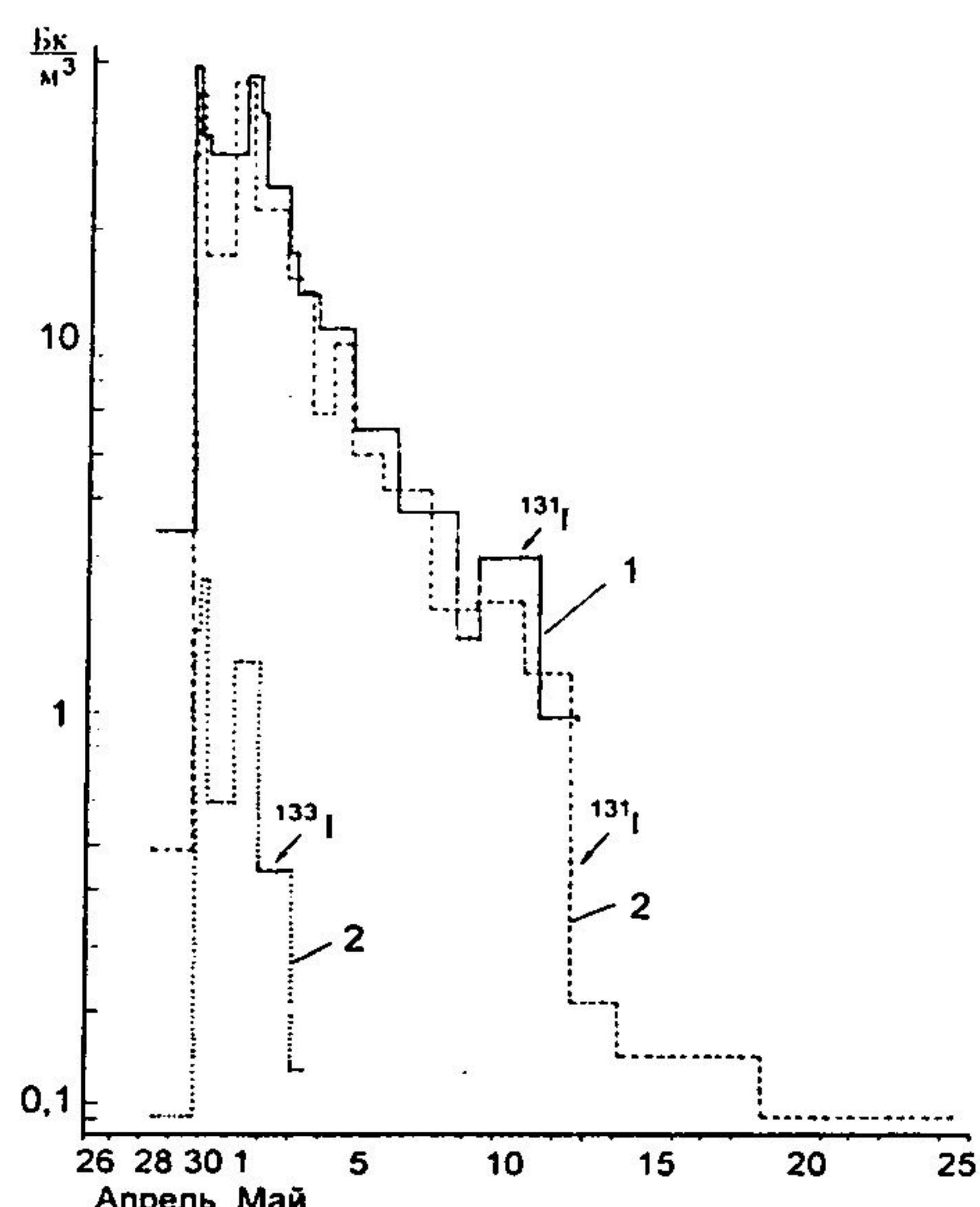


Рис. 3. Суммарная концентрация  $^{131}\text{I}$  в атмосферном воздухе Нойхерберга в апреле-мае 1986 г., по данным Института радиационной гигиены (1) и Института радиационной защиты (2)

стого материала ФПП-15-1,7 отфильтровывали аэрозоли. Во втором (волокнистый фильтр Ф-508 фирмы «Шляйхер и Шюлль», содержащий активированный древесный уголь) из газовой фазы улавливали молекулярный йод и частично органические компоненты радиоиода. Два заключительных слоя состояли также из Ф-508. В них активированный уголь был пропитан 10%-м триэтилендиамином (ТЭДА), что позволяло полностью улавливать органические компоненты радиоиода, в частности  $\text{CH}_3\text{I}$ . Уже в первой пробе, отобранный с 17 ч 30 мин 28 апреля в течение 14,5 ч, были обнаружены высокие уровни  $^{131}\text{I}$ . Максимальная концентрация, 270 Бк/м<sup>3</sup>, была зафиксирована 30 апреля при пробоотборе с 10 до 12 ч. Еще один пик, но с концентрациями на порядок величины меньше, отмечен 7–8 мая. К концу 8-недельного периода наблюдений концентрации газоаэрозольных компонентов  $^{131}\text{I}$  снизились примерно до 0,01 Бк/м<sup>3</sup> (рис. 4).

Из результатов наблюдений следует, что 8 мая, когда ни в одном пункте мониторинга в Европе концентрация  $^{131}\text{I}$  не превышала 10 Бк/м<sup>3</sup> (в Вильнюсе было зарегистрировано 2–3 Бк/м<sup>3</sup>), над развалом реактора IV блока суммарная концентрация газоаэрозольных компонентов  $^{131}\text{I}$  достигала 5030 Бк/м<sup>3</sup> [7].

Уникальные пробы, содержащие радиоактивные продукты, образовавшиеся при аварии IV блока ЧАЭС, были получены 4–5 мая 1986 г. с помощью фильтровальных установок «Тайфун», работавших на борту экспедиционного судна. Оно находилось в это время в северо-

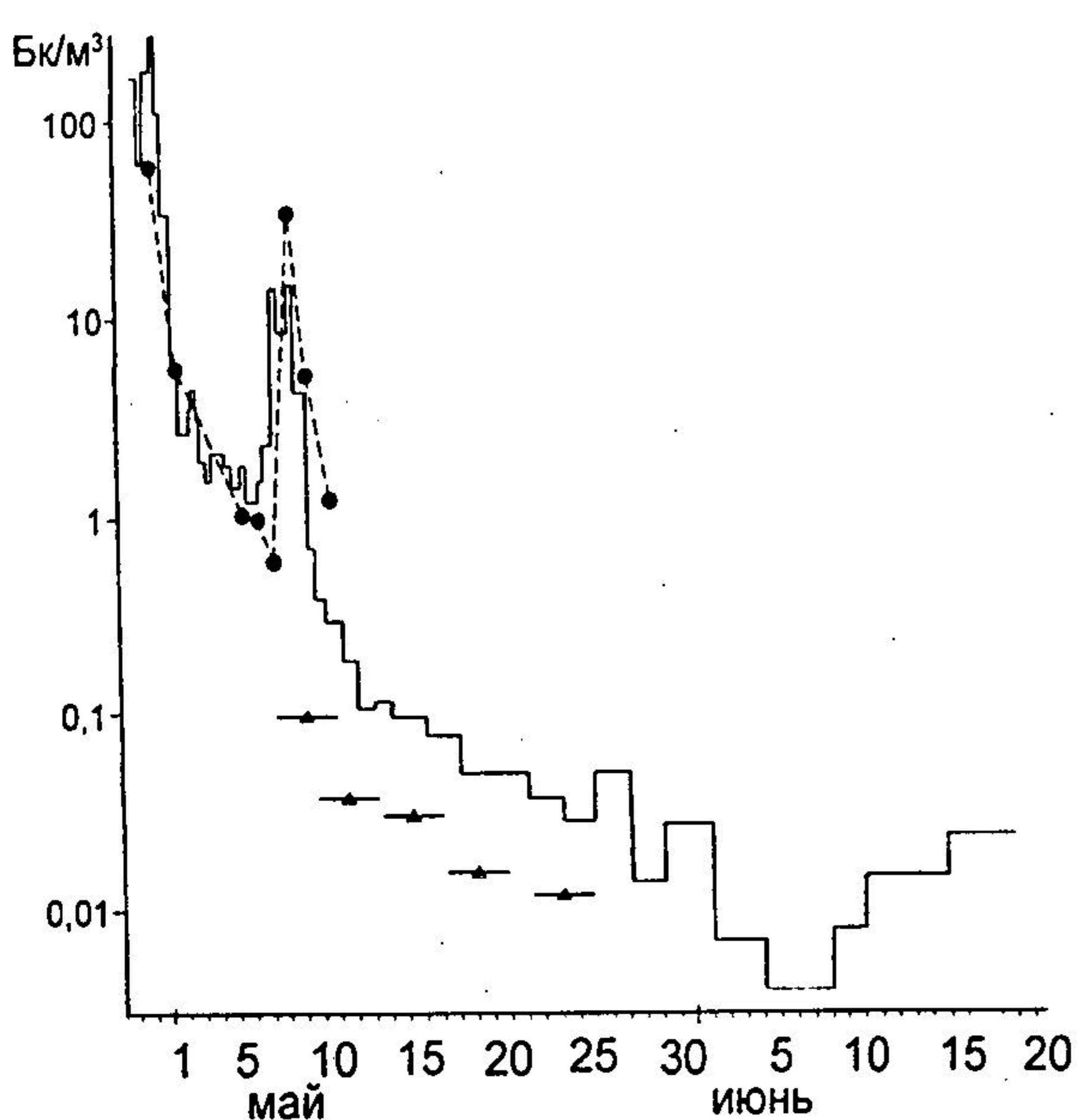


Рис. 4. Суммарные концентрации аэрозольных компонентов  $^{131}\text{I}$  в атмосферном воздухе Варшавы (гистограмма) в апреле-июне, Вильнюса (●) с 30 апреля по 10 мая и Гётtingена (▲) с 7 по 26 мая 1986 г.

восточной части Атлантического океана на удалении около 4000 км от Чернобыля и держало курс на Ленинград.

Первый пробоотбор был начат 4 мая в точке с координатами  $45^{\circ}21'$  с.ш. и  $26^{\circ}25'$  з.д. Заключительный пробоотбор завершен в точке  $58^{\circ}05'$  с.ш. и  $20^{\circ}43'$  в.д. (рис. 5).

Для определения радиоактивного загрязнения атмосферного воздуха по маршруту следования судна 4–11 мая было отобрано 5 проб на сорбционно-фильтрующие материалы. Продолжительность пробоотбора составляла 18–45 ч. Затем материалы СФМ-И демонтировали из установки и разбирали на исходные слои. Из них путем прессования готовили брикеты, которые передавали на  $\gamma$ -спектрометрический экспресс-анализ. При расчетах концентраций радионуклидов принимали, что улавливание как аэрозолей, так и газообразных компонентов было близко к 100%.

В отобранных пробах были обнаружены  $^{103}\text{Ru}$  и  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ , космогенный радионуклид  $^{7}\text{Be}$ . Хотя состав  $\gamma$ -излучателей от пробы к пробе менялся, концентрация  $^{131}\text{I}$  в воздухе была на 1–2 порядка выше других радионуклидов. Ни в одной из проб не были обнаружены  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{141}\text{Ce}$  и  $^{144}\text{Ce}$  [7]. Первая порция  $^{131}\text{I}$ , появившегося в результате чернобыльской аварии, была зарегистрирована в Атлантическом океане 4–5 мая. Его суммарная газоаэрозольная концентрация со-

ставляла  $7,7 \text{ мБк/м}^3$ . Через сутки она возросла до  $17 \text{ мБк/м}^3$ . Максимальная величина ( $34 \text{ мБк/м}^3$ ) наблюдалась 6–7 мая в проливе Ла-Манш. В последующие дни при движении судна на восток концентрация уменьшалась: 7–9 мая –  $31$  и  $10$ – $11$  мая –  $1 \text{ мБк/м}^3$ . С точки зрения изотопного состава наиболее полной является проба от 7–9 мая 1986 г., в которой обнаружены все вышеперечисленные нуклиды. При этом наблюдалось резкое увеличение концентраций всех радионуклидов, а  $^{132}\text{Te}$  и  $^{106}\text{Ru}$  впервые были выявлены в детектируемых количествах. Во время этого пробоотбора судно проследовало от южных берегов Англии до Дании (около 2000 км от Чернобыля).

Изучение траекторий переноса радиоактивных веществ показало, что пробы содержали  $^{131}\text{I}$ , выделившийся в атмосферу в момент взрыва реактора и достигший южной части Скандинавии к 28.04.86 [13]. Послойный анализ проб показал, что  $^{7}\text{Be}$ ,  $^{134},^{137}\text{Cs}$ ,  $^{140}\text{Ba}$  и  $^{140}\text{La}$  практически полностью осели в лобовом слое аэрозольного фильтрующего материала ФПП-15-1,5, тогда как  $^{131}\text{I}$ ,  $^{103}$  и  $^{106}\text{Ru}$  были зарегистрированы еще и в сорбционных («угольных») слоях, т.е. находились в атмосфере в составе аэрозольных и газообразных компонентов.

Данные о вертикальном распределении радиоiodа были получены польскими специалистами из Центральной лаборатории радиологической защиты [23,27]. С помощью реактивного самолета LIM им удалось с 29 апреля по 20 мая выполнить 10 зондажей над северо-восточными районами Польши на высотах до 15 км и пробоотборником с фильтром ФПП-15-1,7 площадью  $1640 \text{ см}^2$  отобрать 39 проб чернобыльских аэрозолей. На высоте 15 км объем отфильтрованного

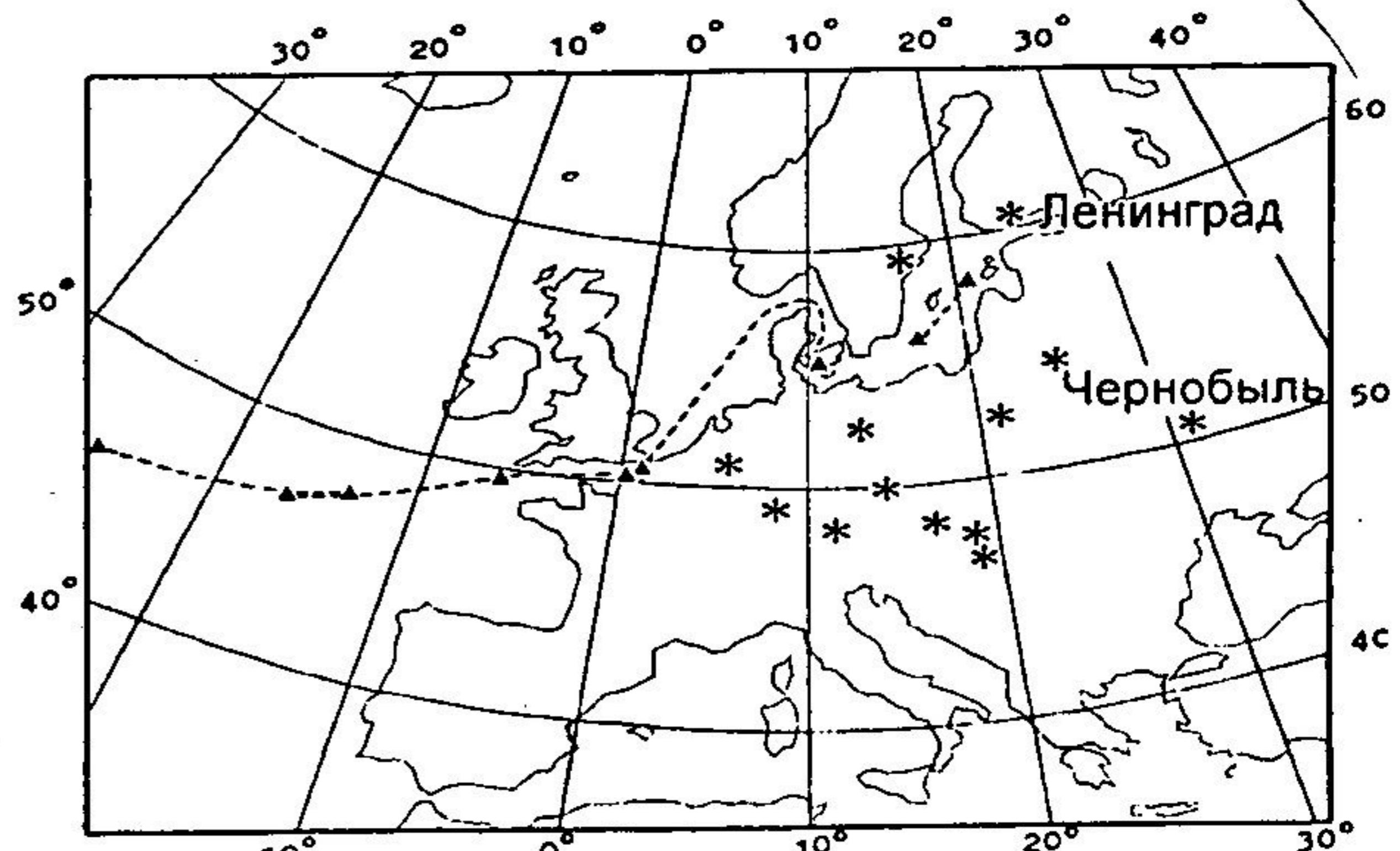


Рис. 5. Маршрут следования научно-исследовательского судна из Атлантического океана в Ленинград в мае 1986 г. (▲ – точки начала и окончания пробоотбора) и местоположение пунктов (\*) одновременного контроля газообразных и аэрозольных компонентов  $^{131}\text{I}$  в Европе

воздуха составлял  $150 \text{ м}^3$ , на малых высотах – до  $1500 \text{ м}^3$ . После полета фильтр спрессовывали в брикет и измеряли на  $\gamma$ -спектрометре.

Относительно газообразных форм радиоиода отмечено, что в Варшаве в мае 1986 г. их доля в суммарной концентрации находилась в интервале 15–85% [26]. Следовательно, фильтр в серднем задерживал только 45%  $^{131}\text{I}$ , находившегося в атмосфере.

Из результатов, представленных в табл. 2, следует, что после взрыва реактора IV блока ЧАЭС радиоактивные вещества достигли даже стратосферы. Об этом свидетельствуют пробы, полученные 29 и 30 апреля. Концентрации аэрозолей  $^{131}\text{I}$  и  $^{137}\text{Cs}$  на высоте 12 и 15 км были в несколько раз выше, чем на высоте 6 и 9 км. В эти дни тропопауза располагалась на высоте 11,1–11,5 км. Наибольшие концентрации аэрозолей  $^{131}\text{I}$  на высотах 6 и 9 км были зарегистрированы над Польшей 5, 7 и 8 мая. Абсолютный максимум в средней тропосфере,  $866 \text{ мБк}/\text{м}^3$ , (при нормальных давлении и температуре) наблюдался 7 мая на высоте 9 км. Следует подчеркнуть, что в эти дни концентрации аэрозолей  $^{131}\text{I}$  в приземном слое воздуха были лишь вдвое выше. Авторы работ [23, 27] считают, что такое высотное распределение радиоиода было связано с поступлением продуктов нового мощного выброса из развода реактора IV блока, начавшегося 2–5 мая и обусловленного горением графитовой кладки реактора.

### *Радиоид в Азии и Америке*

Перенос выброса радионуклидов из развода реактора происходил на огромные расстояния и, естественно, сопровождался рассеянием радиоактивных компонентов. Концентрации в пунктах наблюдения существенно зависели от метеорологических условий и траектории центральной части шлейфа радиоактивной струи.

Одна из расчетных траекторий переноса в восточном направлении первого выброса радио-

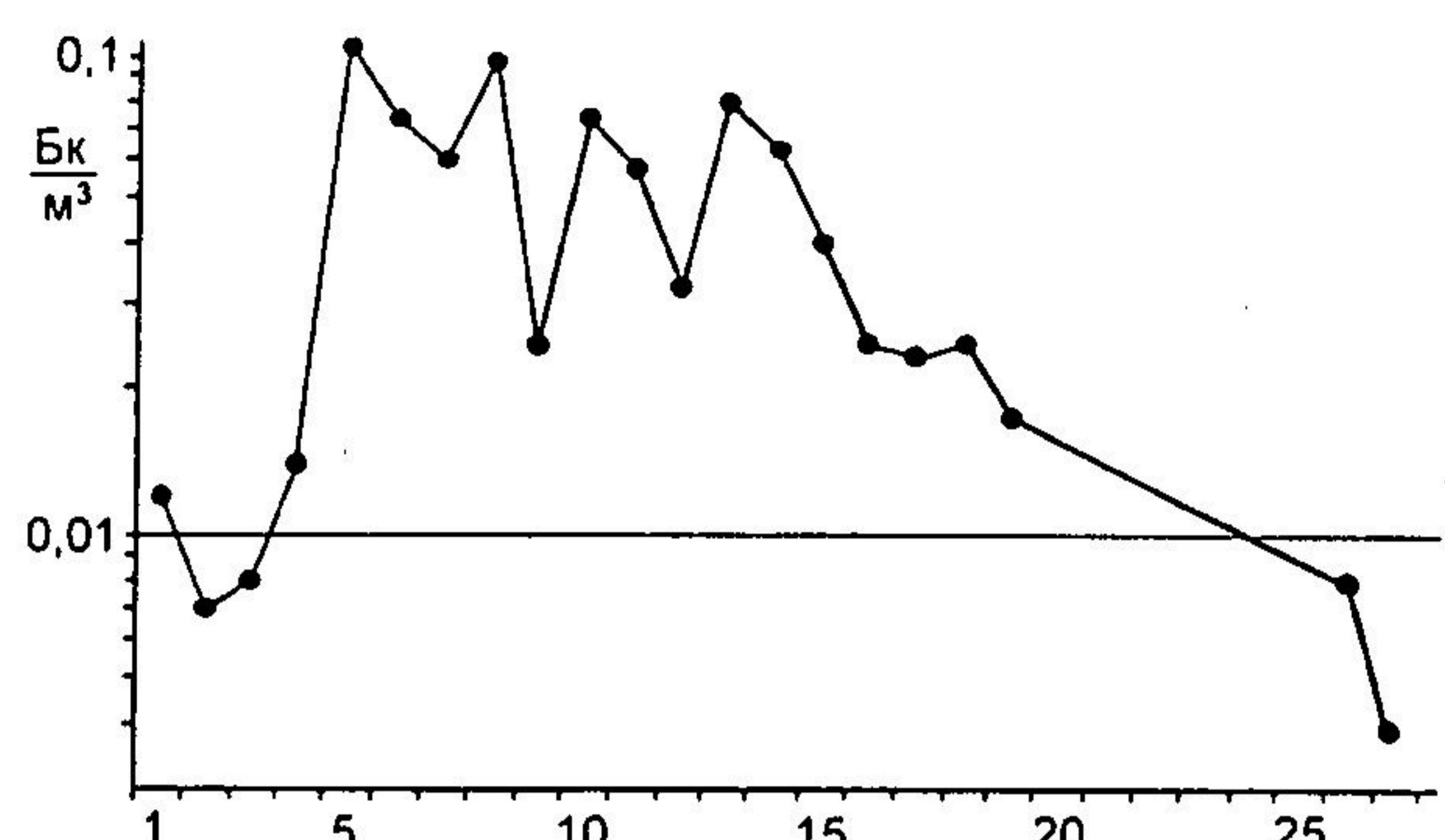


Рис. 6. Концентрация аэрозолей  $^{131}\text{I}$  в Пекине в мае 1986 г. [8]

активных продуктов от взрыва реактора была опубликована в работе [28]. Из нее следует, что 29 апреля головная часть радиоактивного облака достигла района китайского ядерного полигона Лобнор, через двое суток миновала окрестности Пекина и 2 мая прошла над Японией.

По данным пробоотборов в Пекине, представленным на рис. 6, 1 мая концентрация аэрозолей  $^{131}\text{I}$  составляла  $0,012 \text{ Бк}/\text{м}^3$ , 5 мая достигла максимального значения  $0,104 \text{ Бк}/\text{м}^3$ . В последующие три недели наблюдений содержание  $^{131}\text{I}$  постепенно снижалось до уровня первых чисел мая. На Тайване 10-кратное увеличение концентрации  $^{131}\text{I}$  в дождевых осадках было отмечено 7 мая [8].

В Японии первое поступление радиоиода зарегистрировано 3 мая, то есть уже через неделю после взрыва реактора [29–33]. Концентрации аэрозолей  $^{131}\text{I}$  были существенно ниже, чем в Европе, и тем более, чем в ближней зоне ЧАЭС. В Хирошиме первое поступление радиоактивных продуктов чернобыльской аварии датировано 3 мая 1986 г. [30]. Максимальные концентрации аэрозолей  $^{131}\text{I}$  (около  $0,1 \text{ Бк}/\text{м}^3$ ) были зарегистрированы 4 и 8 мая, к 16 мая они снизились на порядок величины. На протяжении этого периода в аэрозольных пробах помимо  $^{131}\text{I}$  и ряда других радиоактивных продуктов детектировали также  $^{132}\text{I}$  и  $^{132}\text{Te}$  [30]. В другом японском горо-

Таблица 2. Концентрации аэрозолей  $^{131}\text{I}$  в тропосфере и стратосфере над Польшей в апреле–мае 1986 г. [23, 27],  $\text{мБк}/\text{м}^3$

Высота пробоотбора, км	Апрель					Май				
	29	30	1	2	5	7	8	11	13	20
Варшава	11 492,3	5195,2	256,1	285,3	178,3	2001,1	1386,6	8,6	2,8	1,5
0										
Миколайски	–	8070,4	438,8	419,0	225,4	1797,2	1950,1	27,9	6,7	3,0
0	–	636,5	944,3	281,8	65,2	978,5	613,6	15,5	1,9	<0,9
1	21,7	1335,5	–	5,3	13,1	97,1	192,5	39,0	1,0	1,8
3	12,6	23,3	–	–	266,6	277,2	340,5	1,0	0,4	0,9
6	12,7	42,6	–	–	627,0	866,1	258,4	7,2	0,9	0,2
9	25,6	36,6	–	–	6,6	51,8	2,7	7,4	<1,2	0,7
12	–	155,1	–	–	17,3	50,4	12,6	<10,0	<10,0	<8,0
15										

Примечания: 1. Концентрации рассчитаны для стандартного объема воздуха.  
2. Миколайки находятся в 180 км северо-восточнее Варшавы.

де, Цукубе, максимум  $^{131}\text{I}$  (около 0,2 Бк/м<sup>3</sup>) был отмечен 5–6 мая.

Многоплановые исследования продуктов чернобыльской аварии, поступавших в Японию, были проведены в университете Киото, в 30 км южнее Осаки [31]. Первое повышение содержания радиоактивных веществ было отмечено в дожде, выпавшем 3 мая. При отборе воздуха на стекловолокнистые фильтры и патроны с активированным углем было установлено, что максимальное содержание  $^{131}\text{I}$  наблюдалось 5 мая. Его концентрация в аэрозолях составила около 0,1 Бк/м<sup>3</sup>, а в сумме с газообразной фазой достигала 0,7 Бк/м<sup>3</sup> [30] (рис. 7).

В Северную Америку радиоактивные продукты чернобыльской аварии стали поступать примерно через две недели после взрыва реактора. В восточной части США, куда перенос радиоактивных продуктов из Чернобыля в первые дни происходил через Скандинавию и Арктику [34–36], при отборе аэрозолей в Нью-Йорке максимальная концентрация аэрозолей  $^{131}\text{I}$  не превысила 0,02–0,03 Бк/м<sup>3</sup> [34], т.е. оказалась на порядок величины меньше, чем измеренная в Японии. На юго-востоке Канады, в районе залива Фанди (в 800 км северо-восточнее Нью-Йорка), 9–11 мая пиковые концентрации  $^{131}\text{I}$  в аэрозолях составляли около 0,01 Бк/м<sup>3</sup>, а в сумме с газообразной фазой – 0,025–0,033 Бк/м<sup>3</sup> [37].

В соответствии с расчетной траекторией головная часть чернобыльского выброса, распространявшаяся в восточном направлении (через Китай, Японию и Тихий океан), должна была 8 мая достичь западного побережья Северной Америки. Действительно, 8–9 мая в ряде пунктов, расположенных в штатах Орегон и Калифорния вблизи Тихоокеанского побережья, были зарегистрированы высокие концентрации аэрозолей  $^{131}\text{I}$ , на порядок величины превосходившие те, которые в те же дни наблюдали на Востоке США и Канады.

Бк/м<sup>3</sup>

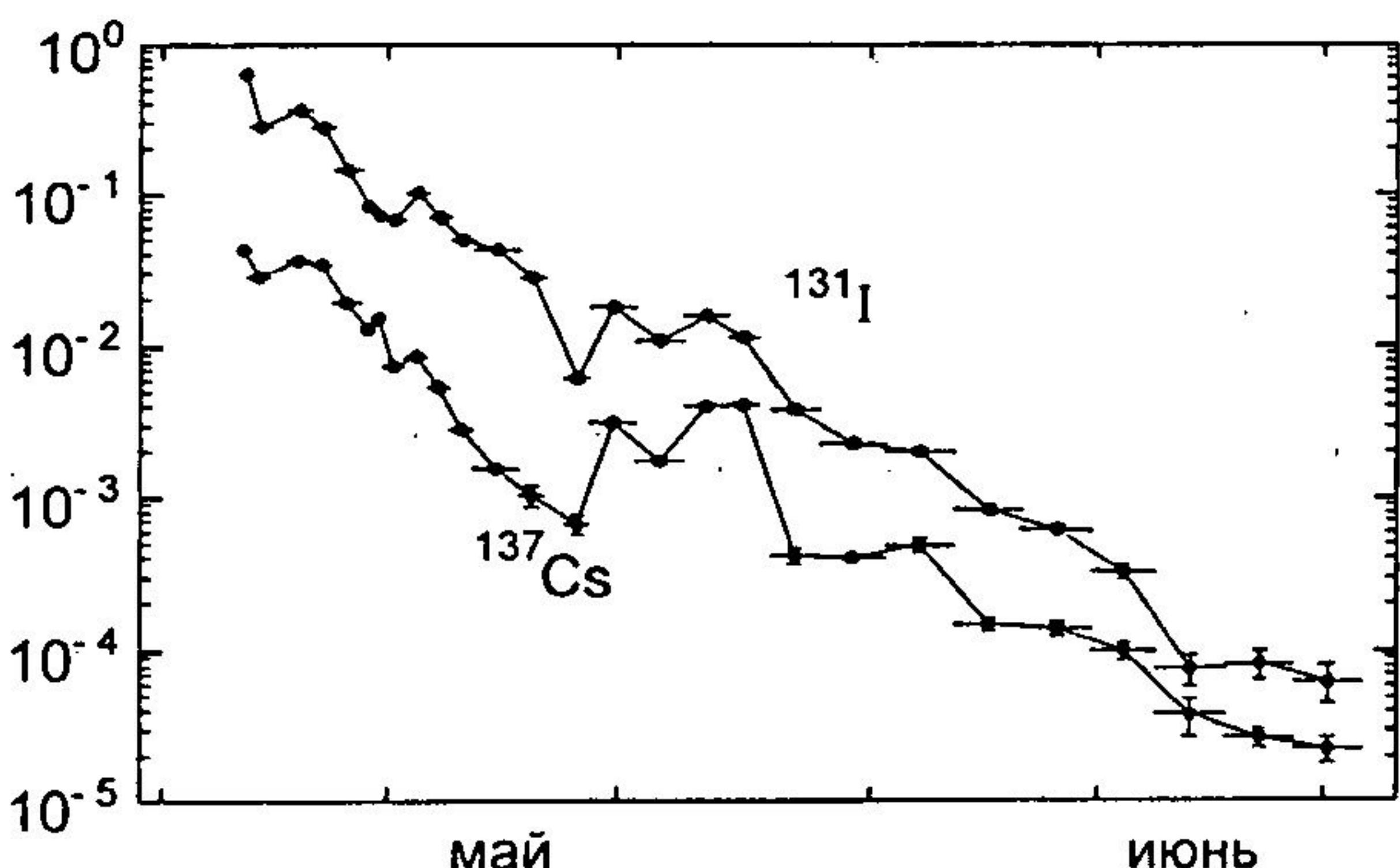


Рис. 7. Концентрации  $^{131}\text{I}$  (аэрозоли и газ) и  $^{137}\text{Cs}$  в Куматори (Япония) в мае-июне 1986 г. [31]

Таблица 3. Концентрации  $^{131}\text{I}$  в пробах приземного воздуха в районе аварийного реактора ЧАЭС [7]

Условия пробоотбора				Концен-трация, Бк/м <sup>3</sup>
Дата, июль 1986 г.	Объект	Расположение относи-тельно IV блока	Объем, м <sup>3</sup>	
5–6	Очистные сооруже-ния	2,5 км севернее	35	0,52
16	АБК-1	1,8 км восточнее	2,1	0,94
22	На маршруте работы ИМР	0,7–2 км юго-западнее	1,2	2,8
25	БНС	3 км северо-восточнее	3,2	1,3

дившие те, которые в те же дни наблюдали на Востоке США и Канады.

### Заключение

В заключение этой части обзора следует добавить, что в июле 1986 г. концентрации  $^{131}\text{I}$  измеряли в 0,7–3 км от аварийного реактора ЧАЭС [7]. Воздух прокачивали переносной воздуходувкой ПВ-20 через пакеты фильтров АФА-РМП и АФАС-И с площадью поверхности 3 или 20 см<sup>2</sup> при объемном расходе 20 л/мин. Как видно из результатов, представленных в табл. 3, концентрации  $^{131}\text{I}$  через 2,5 мес. после аварии на расстоянии 1–3 км от развода составляли 1 Бк/м<sup>3</sup>, что в несколько раз ниже величины допустимой концентрации в атмосферном воздухе населенных пунктов. Раздельное измерение слоев показало, что на фильтрах АФА-РМП йод практически отсутствовал. В этот период он почти целиком находился в составе газообразных веществ, что согласуется с рассмотренными выше данными, полученными над развалом реактора и на значительном удалении от ЧАЭС.

Дегазация радиоиода в заметных количествах происходила из развода реактора IV блока спустя несколько месяцев после аварии. Свидетельством этого стали уникальные пробы, полученные при содействии саперов Инженерных войск Минобороны [38–40]. Они взорвали защитную стену и перебросили над разводом трос. С 28 августа по 11 сентября 1986 г. с высоты 10–30 м над разводом реактора IV блока ЧАЭС были отобраны 11 проб радиоактивных веществ: 8 проб с помощью аппаратуры, которая размещалась в контейнере, передвигавшемся по тротуру, и 3 пробы со штанги, выдвигавшейся из ниши помещения № 6001 блока В.

Наличие газообразных форм радиоиода и радиорутения выявляли с помощью сорбционно-фильтрующих материалов, которые размещали за фильтрами АФА. Известно, что легко летучий тетраоксид рутения хорошо улавливается фильтрами ФПАР, изготовленными из полиарилата. В некоторых пробоотборах 1–3 слоя этого материала устанавливали между фильтрами АФА и слоями СФМ.

В результате  $\gamma$ -спектрометрии во всех пробах были выявлены  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{103}\text{Ru}$  и  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{141}\text{Ce}$  и  $^{144}\text{Ce}$  [7]. Тщательный анализ слоев материалов в пробе, отобранный 29 августа 1986 г., выявил присутствие  $^{131}\text{I}$  в воздухе. Практически полностью он находился в составе газообразных веществ, поскольку был обнаружен только в фильтре АФАС-И, расположавшемся в пробоотборном пакете вслед за материалом ВПА-15-1,8 и двумя слоями ФПАР-АТ-3. Концентрация  $^{131}\text{I}$  составляла около 0,6 Бк/м<sup>3</sup>. Во всех пробах содержание радиоизотопов Ru в слоях фильтров ФПАР-АТ-3 и АФАС-И было не значительным или находилось на уровне фона измерительного комплекса, т.е. не превышало 2–5% его количества в аэрозолях. В конце осени 1986 г. над центральной частью Европейской территории СССР были выполнены с самолета пробоотборы в средней тропосфере: 15 ноября в течение 1 ч на высоте 8 км, 18 ноября в течение 2,3 ч на высоте 6 км [7]. Результаты  $\gamma$ -спектрометрии аэрозольных и сорбционно-фильтрующих слоев представлены в табл. 4.

В обеих пробах на сорбционных слоях был уловлен  $^{131}\text{I}$ . Расчеты показали, что его доля в газовой фазе в первом случае составляла 63%, во втором была близка к 100%.

Обнаружение  $^{131}\text{I}$  спустя 200 дней после взрыва IV блока ЧАЭС было неожиданным, так как концентрация его в атмосфере должна была уменьшиться на семь порядков за счет радиоактивного распада. Однако и других источников его поступления в верхние слои тропосферы найти нелегко. За этот период крупных аварий с ядерными реакторами не отмечалось. Подземные ядерные взрывы, проведенные Францией и

Таблица 4. Концентрация радионуклидов в газо-аэрозольных пробах, взятых над центральной частью Европейской территории СССР в ноябре 1986 г. [7].

Отбор пробы		Концентрация, мБк/м <sup>3</sup>					
Дата (ноябрь 1986 г.)	Высо- та, км	$^{131}\text{I}$	$^{95}\text{Zr}$	$^{95}\text{Nb}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{144}\text{Ce}$	$^{7}\text{Be}$
15	8	0,096	0,05	0,1	0,12	0,16	38
18	6	0,22	0,24	0,66	0,58	0,51	11

США, характеризовались как камуфлетные. Советский Союз, как известно, в 1986 г. ядерных испытаний не проводил, продлив мораторий, объявленный годом раньше.

Набор радионуклидов в табл. 4 и соотношения  $^{144}\text{Ce}/^{95}\text{Zr} = 2,7 \pm 0,3$  показали, что оба пробоотбора выполнены в облаке радиоактивных продуктов, источником которых был взрыв реактора на ЧАЭС. Если зафиксированные концентрации  $^{131}\text{I}$  привести к 26.04.86, т.е. к наибольшему мощному выбросу радиоактивных веществ в атмосферу, то для пробы, отобранный на высоте 8 км, получим 3200 Бк/м<sup>3</sup>, а на высоте 6 км – 7300 Бк/м<sup>3</sup>. Для сравнения укажем, что 8.05.86, когда горение графитовой кладки в развале уже было в значительной мере подавлено, концентрация  $^{131}\text{I}$  составляла 5030 Бк/м<sup>3</sup> [7].

На основании литературных данных и собственных наблюдений можно констатировать, что за короткое время радиоактивные газоаэрозольные продукты чернобыльской аварии распространялись в атмосфере всего Северного полушария. При этом  $^{131}\text{I}$  был одним из преобладающих в смеси радионуклидов, и в течение многих недель его хорошо детектировали в аэрозольных пробах. Высотные измерения радиоиода показали, что при взрыве реактора IV блока ЧАЭС продукты аварии были заброшены не только в среднюю и верхнюю тропосферу, но и в стратосферу. Вследствие струйных течений на больших высотах значительные количества радиоиода и других радионуклидов в течение недели достигли Японии и за 10–14 дней – Северной Америки. Пространственное распределение радиоиода в первые дни и недели после аварии зависело от величины его выброса из развода реактора и от метеоусловий, определявших траектории переноса и рассеяние в атмосфере.

#### Список литературы

1. Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия. – Доклад советских экспертов, представленный 25–26 августа 1986 г. в МАГАТЭ. Гос. Комитет по использованию атомной энергии, М., 1986.
2. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ – Атомная энергия, 1986, т. 61, вып. 5, с. 301–320.
3. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред /под ред. Израэля Ю.А.; Л.: Гидрометеоиздат, 1990.
4. Матушенко А.М. В воздухе самолеты радиационной разведки – В сб.: Чернобыль: Катастрофа. Подвиг. Уроки и выводы (научно-публицистическая монография), М., 1996, с. 436–456.
5. Горин В.В. Организация и ведение воздушной радиационной разведки при крупных радиационных авариях. – В сб.: Москва – Чернобылю (научно-публицист-

- тическая монография), М., Воениздат, 1998, кн. I, с. 90–98.
6. Борисов Н.Б., Вербов В.В., Кауров Г.А., Огородников Б.И. и др. Состав и концентрации газоаэрозольных радиоактивных веществ над развалом IV блока ЧАЭС и в дальней зоне в мае 1986 г. – В сб.: Охрана окружающей среды, вопросы экологии и контроль качества продукции, М.: НИИТЭХИМ, 1992, реф. сб., вып. I, с. 11–17.
  7. Борисов Н.Б. Огородников Б.И., Скитович В.И. и др. Исследование концентраций и газоаэрозольного состава радиоиода в свободной атмосфере в первые месяцы после Чернобыльской аварии, при пуске III блока ЧАЭС и в 1988–1989 гг. – Там же, 1992, вып. 5, с. 1–15.
  8. Warman E. et al. Complication of radiological measurements from the Chernobyl accident. – Stone Webster engineering corporation, Boston, Massachusetts, December 1986.
  9. Луянене Г.А., Луянас В.Ю. Короткоживущие изотопы теллура и йода в атмосфере. – В сб.: Физика атмосферы, Вильнюс, 1991, вып. 15, с. 48–50.
  10. Ясиоленис Р.Ю. Радиационное состояние атмосферы на северо-востоке Литвы после аварии на ЧАЭС. – Там же, с. 54–64.
  11. Raes F. et al. Radioactivity measurements in air over Europe after the Chernobyl accident–Atmospheric Environment, 1990, v. 24A, № 4, p. 909–916.
  12. Radioactivity measurements in Europe after the Chernobyl accident. Part 1: Air. (Eds: F. Raes et al.) Commission of the European Communities. Report EUR – 12269, 1989.
  13. Hötzl H. et al. Ground depositions and air concentrations of Chernobyl fallout radionuclides at Munich-Neuherberg – Radiochimica Acta, 1987, v. 41, p. 181–190.
  14. Hoffman P. et al. Radionuclides from the Chernobyl accident in the FRG– Ibid, v. 41, p. 173–179.
  15. Povinec P. et al. Aerosol radioactivity monitoring in Bratislava following the Chernobyl accident–J. Radioanal. Nucl. Chem. Letters, 1988, v. 126, № 6, p. 467–478.
  16. Wilhelmova L. et al. Aerosol and gaseous radioiodine concentration in the air of Prague after the Chernobyl accident – Ibid, 1987, v. 117, № 5, p. 305–309.
  17. Wilhelmova L. et al. Zastoupeni forem  $^{131}\text{I}$  v ovzduší po havarii v Černobylu–Jaderna energie, 1988, v. 34, № 12, p. 446–448.
  18. Biro T. Radiation consequences in Hungary of the Chernobyl accident–Report of Hungarian Atomic Energy Commission, Budapest, 34p., July, 1986.
  19. Feher I. Experience in Hungary on the radiological consequences of the Chernobyl accident–Environment International, 1988, v. 14, p. 113–135.
  20. Warman E.A. Soviet and far-field radiation measurements and an inferred source term from Chernobyl–Preprint TP 87–13, Stone Webster engineering corporation, Boston, Massachusetts, 1987.
  21. Maqua M. et al. Deposition velocity and washout coefficient of radionuclides bound to aerosol particles and elemental radioiodine–Radiation Protection Dosimetry, 1987, v. 21, № 1/3, p. 43–49.
  22. Dulinski M. et al. Tracing of the radioactive cloud in Krakow after the Chernobyl nuclear accident. – Acta geophysica Polonica, 1986, v. 34, № 4, p. 405–412.
  23. Kownacka L. et al. Vertical distribution of  $^{131}\text{I}$  and radiocesium in the atmosphere over Poland after Chernobyl accident–Ibid, 1987, v. 35, № 1, p. 101–109.
  24. Mietelski J. et al. Long lived isotopes in the Chernobyl radioactive cloud at Krakow – Report of Institut fizyki jadrowej, Krakow, March, 1988, 15 p.
  25. Devell L. et al. Initial observation of fallout from the reactor accident at Chernobyl – Nature, 1986, v. 321, № 6067, p. 192–193.
  26. Krześniak J. et al. Pomiary steżeń  $^{131}\text{I}$  po awarii w Chernobylu – Opracowanie wewnętrzne N 6/86/Z-VI, Centralne laboratorium ochrony radiologicznej, Warszawa, 1986.
  27. Jaworowski Z., Kownacka L. Tropospheric and stratospheric distributions of radioactive iodine and cesium after the Chernobyl accident – J. Environmental Radioactivity, 1988, v. 6, p. 145–150.
  28. Costa Ch., Kuroda P.K. Fission products in air over the United States after the Chernobyl event. – Radiochimica Acta, 1989, v. 47, p. 199–208.
  29. Aoyma M. et al. High level radioactive nuclides in Japan in May – Nature, 1986, v. 321, p. 819–820.
  30. Shizuma K. et al. Observation of fallout in Hiroshima caused by the reactor accident at Chernobyl – Int. J. Radiat. Biol., 1987, v. 51, № 2, p. 201–207.
  31. Imanaka T. et al. Fallout in Japan from Chernobyl – J. Environ. Radioactivity, 1986, v. 4, p. 149–153.
  32. Higuchi H. et al. Radioactivity in surface air and precipitation in Japan after the Chernobyl accident – Ibid, 1988, v. 6, p. 131–144.
  33. Ishida J. et al. Environmental radioactivity around Tokai-Works after the reactor accident at Chernobyl – Ibid, 1988, v. 7, p. 121–130.
  34. Felly H. et al. Fallout in the New York metropolitan area following the Chernobyl accident – Ibid, v. 7, p. 177–191.
  35. Gavrilas M.  $^{131}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the environment following the Chernobyl reactor accident – J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles, 1988, v. 123, № 1, p. 39–60.
  36. Liu C.K., Faller S.H., Kuroda P.K. Ruthenium-103, iodine-131, tellurium-132 and cesium-137 in air after Chernobyl event – Radiochimica Acta, 1990, v. 50, p. 159–167.
  37. Smith J.N., Ellis K.M. Time dependent transport of Chernobyl radioactivity between atmospheric and lichen phases in Eastern Canada – J. Environ. Radioactivity, 1990, v. 11, p. 151–168.
  38. Огородников Б.И. Над развалом – Энергия: экономика, техника, экология, 1992, № 1, с. 26–30.
  39. Носач А.А. Чернобыльские будни. – В сб.: Чернобыль: Катастрофа. Подвиг. Уроки и выводы (научно-публицистическая монография), М.: Изд. «Интер-Весы», 1996, с. 492–495.
  40. Кузнецов В.П. Инженерные войска в Чернобыле. – В сб.: Москва–Чернобылю (научно-публицистическая монография), 1998, М., Воениздат, кн. I, с. 124–134.

**Ключевые слова**

Чернобыльская авария, радионуклиды, радиоийод, выброс, концентрации, распределение, фильтры, перенос