

УРОВНИ ВЫБРОСОВ РАДИОУГЛЕРОДА ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СССР

М. Г. Бузынный

Научный центр радиационной медицины АМН Украины, Киев

Проведено сравнение величины радиоуглеродных газовых выбросов различных объектов топливно-энергетического комплекса – завода по переработке отработавшего топлива (Томск-7, Россия), крупнейшей в Украине Запорожской АЭС (штатные выбросы) и Чернобыльской АЭС (аварийные и штатные выбросы). Для ретроспективного определения величины газовых выбросов проводились исследования уровня ^{14}C , накопленного в годичных слоях сосны. Измерения образцов проводились на современном жидкостно-сцинтилляционном спектрометре Quantulus 1220TM. Для измерений готовились образцы бензола с добавлением сцинтилляторов РРО 4 г · л⁻¹ и РОРОР 0,1 г · л⁻¹. Величина выбросов $^{14}\text{CO}_2$ для Томска-7 составила до 30 (45) ТБк за год в 1985 - 1988 гг. или 450 (620) ТБк за время работы в 1959 - 1993 гг. Выбросы $^{14}\text{CO}_2$ Запорожской АЭС составляют до 2,2 ТБк · год⁻¹, штатные выбросы $^{14}\text{CO}_2$ Чернобыльской АЭС - до 3,3 ТБк · год⁻¹ или до 20,8 ТБк за время работы станции до 1996 г. Аварийные выбросы $^{14}\text{CO}_2$ Чернобыльской АЭС составили до 50,0 ТБк. На долю аэрозольной компоненты аварийного выброса ^{14}C приходится от 12 до 62 ТБк.

Введение

По данным ООН суммарный выброс радиоуглерода объектов ядерной индустрии составлял 150 ТБк в 1980 г., 360 ТБк в 1985 г., 580 ТБк в 1990 г., и на конец 2000 г., по оценкам, составил более 1000 ТБк [1]. Существует некоторое противоречие во мнении относительно вклада различных типов ядерных объектов в суммарное количество выбрасываемого ^{14}C . По прогнозам [2] почти 70 % общего количества выбросов ^{14}C в 2000 г. составит переработка топлива. Исследования, проведенные в окрестностях завода по переработке отработавшего топлива (Селафилд, Великобритания), дают значения выбросов ^{14}C до 20 ТБк в год [3, 4]. Аналогичные исследования посвящены накоплению ^{14}C в годичных слоях деревьев за время работы завода по переработке отработавшего топлива (Томск-7, Россия), расположенного в Западной Сибири и работающего, начиная с 1953 г., с использованием уран-графитовых реакторов (АДЭ-4.5) [5 - 8].

Исследования аварийных выбросов ^{14}C на Чернобыльской АЭС включали анализы деревьев, покрывающих расстояние до 35 км от АЭС [9 - 15]. Для двух деревьев сосны из этой выборки проводились исследования годичных слоев за время работы АЭС. Они позволили произвести расчеты соответствующих штатных выбросов ^{14}C [16]. В качестве фона использованы образцы древесины дерева, выросшего на расстоянии около 200 км южнее Чернобыльской АЭС.

Запорожская АЭС представляет интерес как самая мощная на территории Украины АЭС с реакторами другого типа - ВВЭР-1000. Исследования ее выбросов ^{14}C включали как прямые интегральные измерения в трубе, так и ретроспективное определение по годичным слоям дерева, которые дали согласованные результаты. Проводилось также определение ^{14}C и в других объектах окружающей среды [17, 18].

Методы исследований

Отбор, подготовка и измерение образцов

Годичные слои дерева дают усредненную информацию о содержании ^{14}C в составе CO_2 воздуха за вегетационный период, в силу чего они являются прекрасным материалом для ретроспективного восстановления картины колебаний уровня ^{14}C в атмосфере. Для исследования годичных слоев выбирались уединенные деревья с развитой кроной или де-

ревья, стоящие на опушке леса и растущие в непосредственной близости от населенных пунктов. Для проб древесины Томска-7 были выбраны деревья, выросшие на расстоянии 8 - 10 км на юго-восток и 10 - 15 км на северо-запад от объекта. Сеть отбора образцов для исследований ^{14}C вокруг Чернобыльской АЭС включила в себя более 60 точек и покрыла практически всю зону отчуждения АЭС. Для определения уровней выбросов ^{14}C в окрестностях Запорожской АЭС проводились исследования годовичных слоев деревьев и одногодичной растительности. Для проведения прямых измерений $^{14}\text{CO}_2$ в составе воздуха пробы отбирались при помощи щелочной ловушки в трубе и на территории промплощадки Запорожской АЭС.

Для подготовки образцов использованы современные методы. Во всех случаях счетной формой являлся бензол. Для проведения исследований древесины пробы подвергались предварительной обработке путем вымывания экстрактивных веществ спирто-бензольной смесью в аппарате Сокслетта в течение 24 ч. Для большинства исследуемых деревьев в окрестностях Чернобыльской АЭС помимо образцов 1986 г. проводились исследования для доаварийных (1985 г.) и послеаварийных слоев древесины (1987 г.), что позволило более точно определять ^{14}C аварийного происхождения. Это дало возможность избежать ложных определений в тех случаях, когда точная хронологическая идентификация годовичных слоев была затруднена. Для ряда образцов 1986 г. проводилось разделение древесины на раннюю и позднюю, что существенным образом повысило точность определения как аварийных, так и штатных выбросов Чернобыльской АЭС. Отдельные образцы деревьев, которые имели достаточно широкие годовичные слои 1986 г., были проанализированы с большей подробностью - в них ранняя и поздняя древесина делилась на две равные части [14].

Все измерения проводились на низкофоновом жидкостно-сцинтилляционном спектрометре Quantulus 1220TM фирмы Wallac. В качестве калибровочного образца был использован бензол, содержащий 500 % от современного уровня ^{14}C окружающей среды. Результаты были скорректированы с учетом эффектов изотопного фракционирования и гашения счетных образцов. Погрешность измерений не превышала 1,5 %.

Применяемые расчетные методы и модели

Расчет величины выбросов ^{14}C для Томска-7 и Запорожской АЭС осуществлялся в предположении стационарного выброса по аналитическому выражению модели, полученной в [3, 4]. Для расчетов величины выбросов в Чернобыльской АЭС применялась модель LEDI в предположении о существенно нестационарном источнике выброса (с интенсивностью выброса и начальной высотой подъема активности, изменяющимися во времени в течение первых 10 сут аварии) [14, 19] по реальным данным о погоде в течение рассматриваемого периода. Для расчетов была использована стандартная метеорологическая информация, полученная по данным радиозондирования атмосферы в Киеве и Гомеле и включающая в себя данные о скорости и направлении ветра, температуре и давлении на высотах до 2000 м с периодичностью 6 ч.

Результаты

Завод по переработке отработанного топлива Томск-7

Колебания уровней накопления ^{14}C в годовичных слоях сосны определены для двух деревьев, выросших в 8 - 10 км в северо-восточном направлении и 10 - 15 км в юго-западном направлении от завода за время его работы 1953 - 1993 гг. Для оценки избыточного ^{14}C его уровни сравнивались с данными [20], рассматриваемыми в качестве фона. Обе серии результатов приведены на рис. 1 и в таблице. Как видно по результатам, уровни выбросов ^{14}C существенно увеличились, начиная с 1970 г., что отразилось на росте уровня избыточного ^{14}C , превышающего $120 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ углерода ($\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{C}$) в годовичных слоях дерева. Снижение уровня выбросов ^{14}C наметилось только в 1993 г.

Для оценки уровня выбросов использовали результаты, сведенные в таблицу, и параметры эмпирической модели, полученной при исследованиях в окрестностях Селафилда [3, 4] для стационарного источника выброса, которые позволили произвести пересчет от величины избыточного ^{14}C , накопленного в годичных слоях древесины, к величине выбросов. По данным [3, 4] за 1985 г. на расстоянии 10 км от источника выброса величина выбросов 7 ТБк соответствует избыточной активности ^{14}C в годичном слое, равной 20–30 Бк · кг⁻¹ · С. По этим данным был получен пересчетный коэффициент, равный 0,23 (0,35)¹ (ТБк · Бк⁻¹ · кг · С). Отсюда был оценен максимальный годовой выброс величиной 31 ТБк в 1988 г. (рис. 2), что в 1,5 (2,5) раза выше таковых для Селафилда в 1981 г., а суммарная величина выбросов за время работы завода с 1953 по 1993 г. составила 450 (620) ТБк.

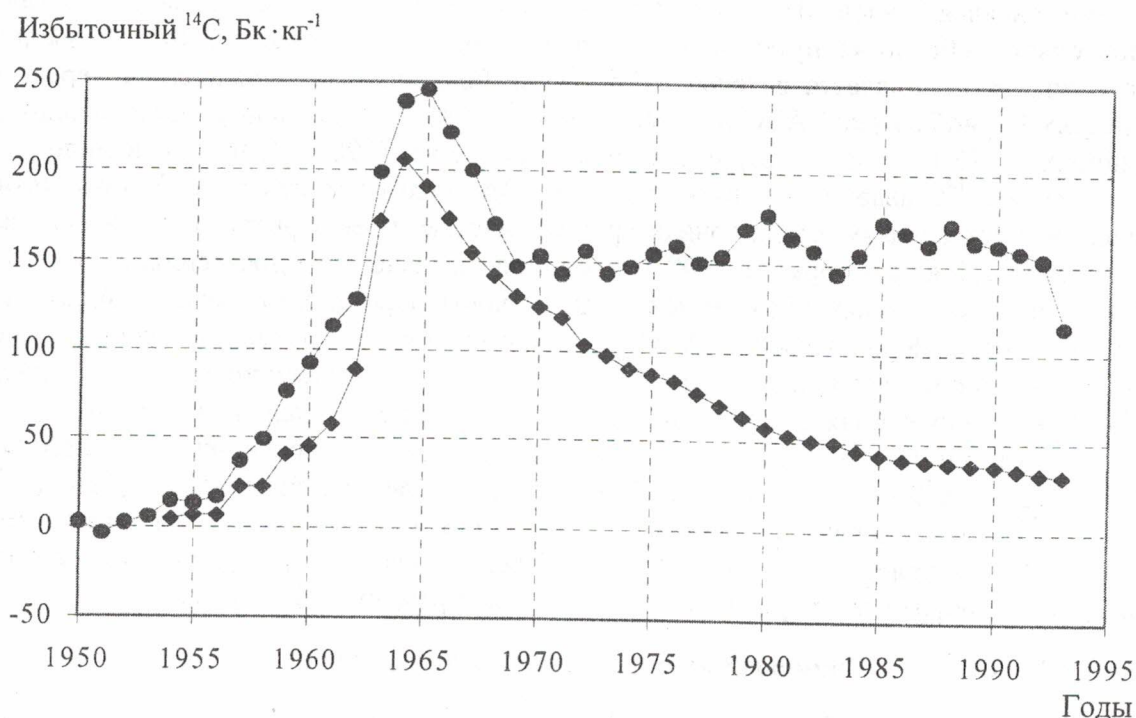


Рис. 1. Избыточный ^{14}C в годичных слоях дерева сосны (I) (см. табл.) (Бк · кг⁻¹ · С) вблизи Томска-7 [5, 7] – верхняя кривая и соответствующие фоновые данные [20] – нижняя кривая.

Избыточный ^{14}C (Бк · кг⁻¹ · С) в годичных слоях сосны в районе размещения завода Томск-7.
Образец (I) в 8–10 км в северо-восточном направлении и образец (II) в 10–15 км в юго-западном направлении от завода [7]

Год	(I)	Год	(I)	(II)	Год	(I)	(II)	Год	(I)	(II)
1953	5,4	1964	239,3		1975	154,8	89,0	1985	173,2	57,7
1954	14,8	1965	245,4	—	1976	159,1	109,6	1986	167,5	62,7
1955	13,4	1966	221,3	—	1977	149,8	90,8	1987	160,9	56,8
1956	16,6	1967	200,0	—	1978	153,7	81,9	1988	171,8	56,5
1957	37,5	1968	170,7	—	1978	153,7	81,9	1989	163,2	—
1958	49,0	1969	146,9	129,4	1979	168,7	67,6	1990	160,7	—
1959	76,5	1970	153,0	126,2	1980	177,1	75,6	1991	157,1	—

¹ Здесь и далее приводятся две оценки интервала колебания величины.

Продолжение

Год	(I)	Год	(I)	(II)	Год	(I)	(II)	Год	(I)	(II)
1960	92,2	1971	143,5	121,0	1981	164,6	67,0	1992	153,0	—
1961	113,0	1972	155,9	113,5	1982	157,3	75,6	1993	115,3	—
1962	128,3	1973	143,7	101,7	1983	145,1	55,6			
1963	198,6	1974	147,6	101,2	1984	155,5	64,9			

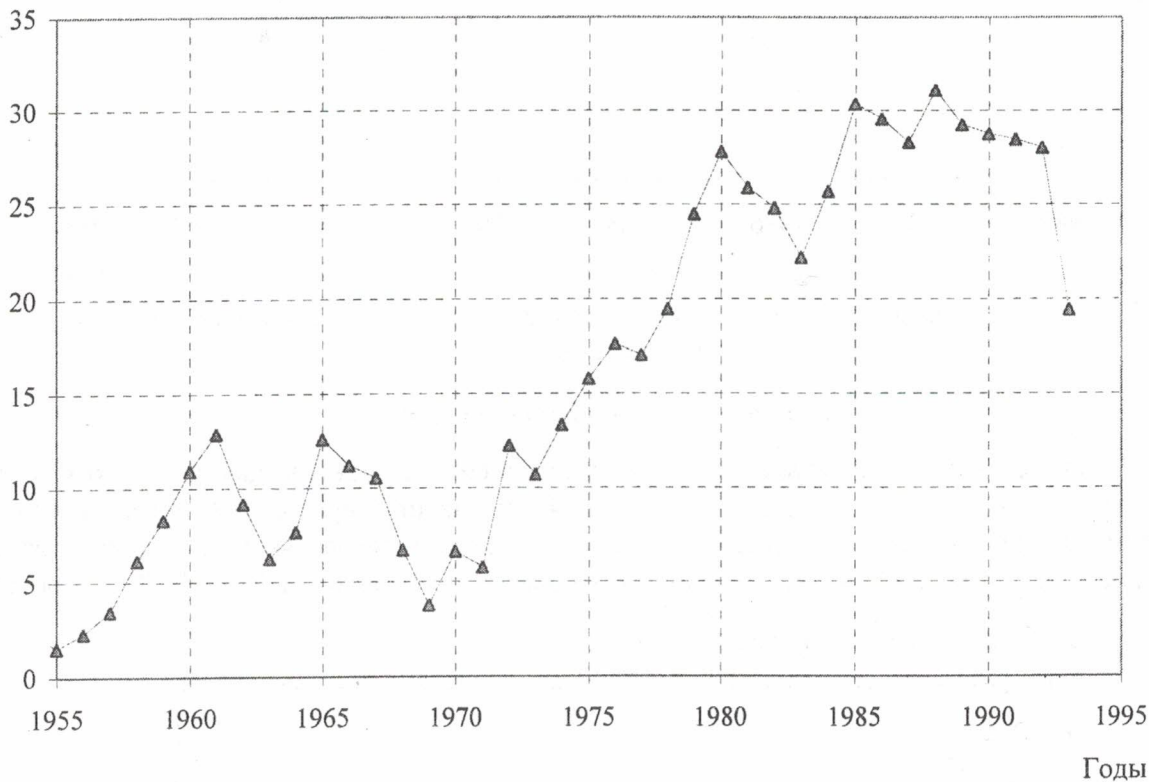
Ежегодные выбросы ^{14}C , $\text{N} \cdot \text{ТБк}$ 

Рис. 2. Ежегодные выбросы ^{14}C ($\text{N} \cdot \text{ТБк}$, где $\text{N} = 1,0 (1,5)$) для завода Томск-7, восстановленные по величине избыточного ^{14}C , накопленного в годичных слоях деревьев [5, 6] и в соответствии с параметрами эмпирической модели [3, 4].

Выбросы Запорожской АЭС

Прямые измерения уровня выброса ^{14}C в воздух. Пробы воздуха для анализов $^{14}\text{CO}_2$ отбирались методами щелочной ловушки, описанными в [21]. При расчете годового выброса в составе воздуха были использованы следующие параметры: объем пробы 600 л, химический выход 80 – 90 %, выброс воздуха в вентиляционную трубу – $68000 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$. Годовой выброс для одного реактора составил 0,41 (0,47) ТБк.

Уровни ^{14}C в годичных слоях деревьев. Проанализированы образцы древесины сосны, выросшей в 5 км на юг от Запорожской АЭС с 1985 по 1993 г. Уровень избыточного ^{14}C составил от 5 до 55 Бк $\cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{C}$ (рис. 3). Используя применяемый ранее подход и соответствующий коэффициент пересчета 0,035 (0,055) (ТБк $\cdot \text{Бк}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{C}$) в годичном слое дерева в 5 км от источника выброса [3, 4], получаем величину выброса $^{14}\text{CO}_2$ в 1991 г., равную 2,7 (3,0) ТБк, что согласуется с приведенными выше данными о выбросах в трубе одного из пяти работающих (на момент исследований) энергоблоков Запорожской АЭС.

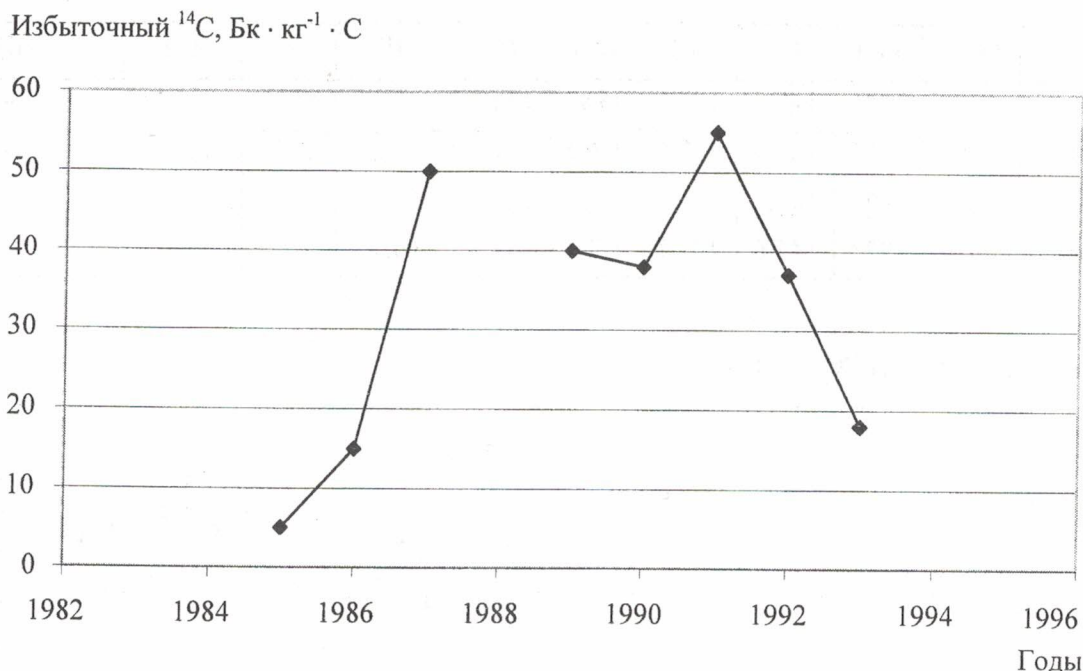


Рис. 3. Избыточный ^{14}C (Бк · кг⁻¹ · С) в годичных слоях дерева, обусловленный влиянием Запорожской АЭС.

Выбросы Чернобыльской АЭС

Влияние штатных и аварийных газовых выбросов на уровень накопленного в годичных слоях дерева ^{14}C четко выражено на рис. 4, где на примере одного дерева показаны долговременные колебания штатных выбросов ^{14}C и для нескольких деревьев – вариативность аварийных выбросов ^{14}C 1986 г. Колебания ^{14}C в период 1965 – 1978 гг. соответ-

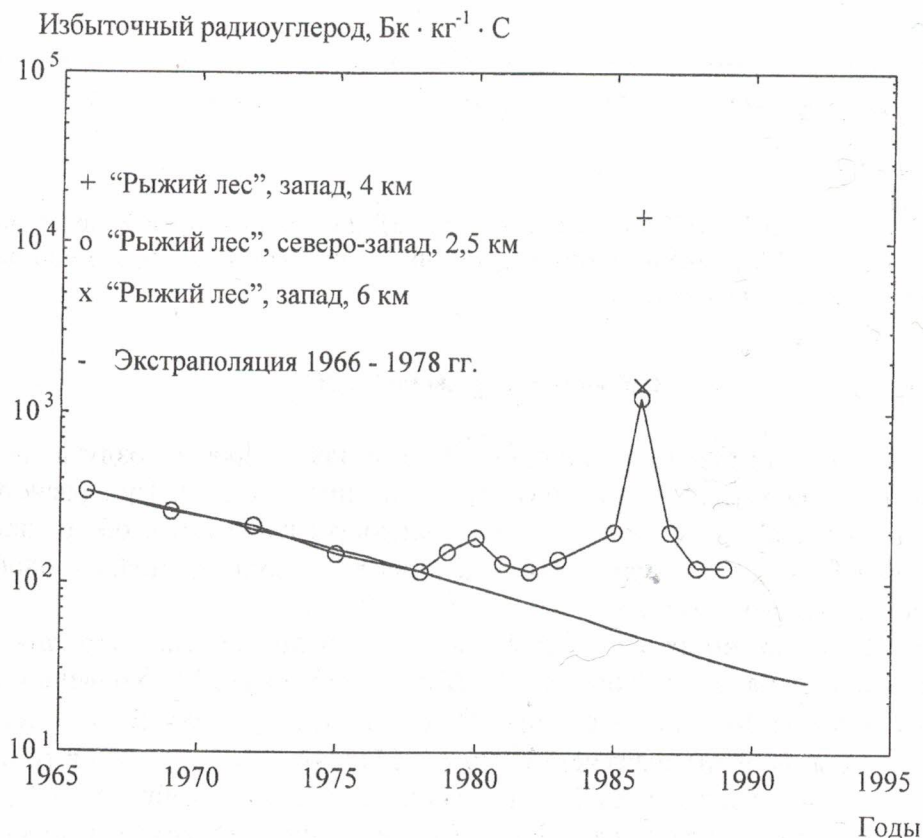


Рис. 4. Избыточный ^{14}C (Бк · кг⁻¹ · С) в годичных слоях сосны, отобранных в окрестностях Чернобыльской АЭС [11].

ствуют глобальным колебаниям ^{14}C в атмосфере. Установлено, что ^{14}C аварийного происхождения вошел в состав только ранней древесины 1986 г. [6]. Анализ содержания ^{14}C отдельно по ранней и поздней древесине 1986 г., проводимый в дальнейшем для большинства образцов, позволил провести эти определения более надежно и точно. Сеть отбора образцов древесины и лесной подстилки охватывала более 60 пунктов по территории зоны отчуждения на расстоянии до 60 км от Чернобыльской АЭС (рис. 5). Интегральное пространственное распределение газообразного ^{14}C , полученное путем анализа удельной активности радиоуглерода древесины, приведено на рис. 6 [14]. На рисунке видны ярко выраженные максимумы аварийного выброса, характерные для западного и северо-восточного следов выброса.

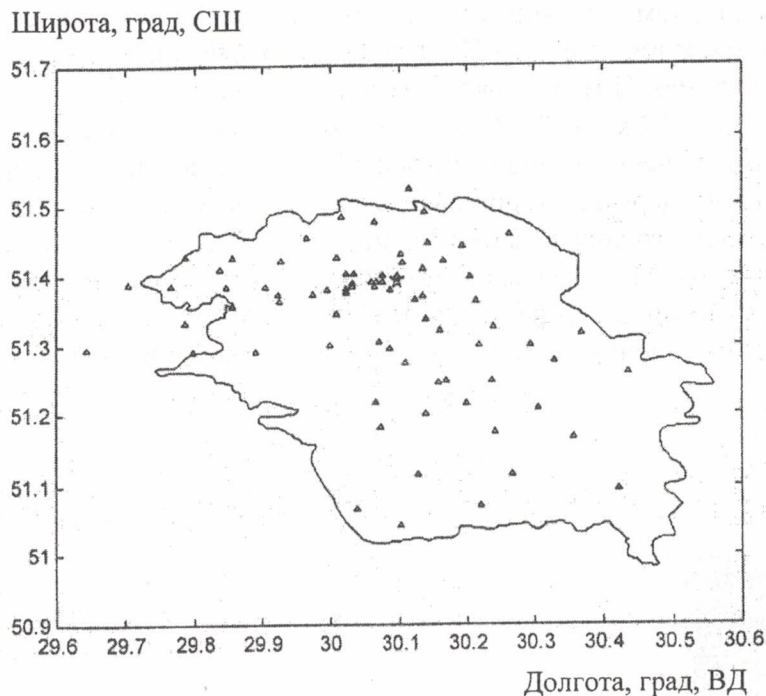


Рис. 5. Схема отбора проб для проведения радиоуглеродных исследований [6, 10, 11].

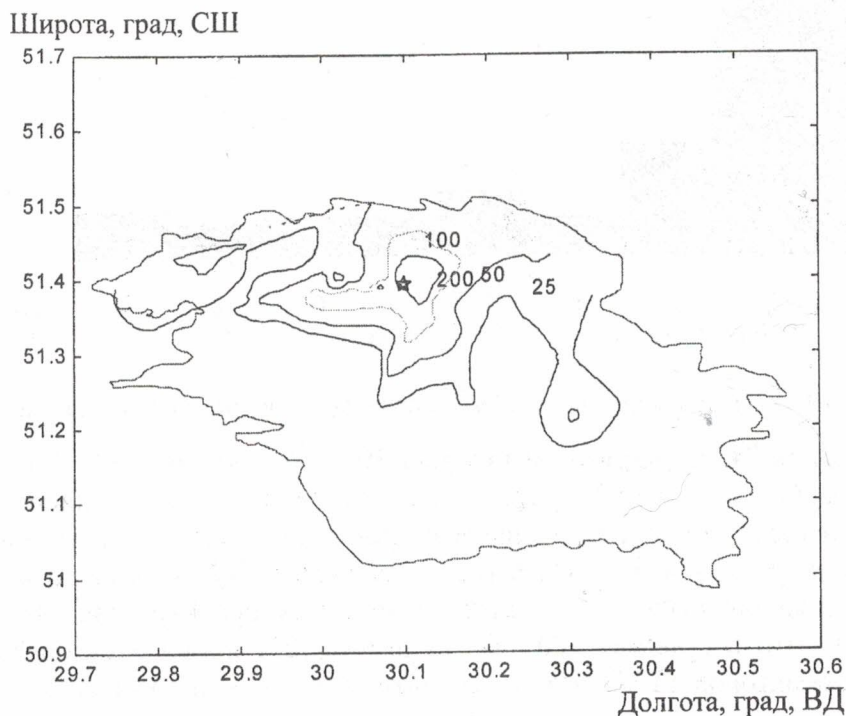


Рис. 6. Интегральное пространственное распределение газообразного ^{14}C .

При помощи модели атмосферного переноса были выполнены расчеты поля интегральной по времени объемной концентрации ^{14}C в приземном слое воздуха 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС и была рассчитана концентрация аварийного ^{14}C в древесине [14, 15]. В результате сопоставления результатов расчетов с данными реальных измерений было восстановлено поле концентраций ^{14}C по всей территории 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС, а также оценены как суточные выбросы ^{14}C в атмосферу за период с 26 апреля по 5 мая 1986 г., так и общее количество $^{14}\text{CO}_2$, вышедшее из аварийного реактора за этот период [14].

Пространственное распределение ^{14}C аварийного происхождения в древесине 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС, полученное на основе моделирования атмосферного переноса выброса из 4-го блока, указало на три основных следа: западный, сформированный в основном 26 апреля, северо-восточный, вызванный интенсивным радиоактивным выбросом в течение 27 - 28 апреля, и южный, определяемый выбросом за период с 30 апреля по 5 мая [14]. Согласно расчетам, максимум поля концентраций ^{14}C достигал значений более $400 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{С}$ и расположен в северо-восточном направлении. Полученное в результате численного моделирования поле содержания ^{14}C аварийного происхождения в годовых слоях деревьев хорошо согласуется с результатами прямых измерений (см. рис. 5). Оценки временного хода выброса ^{14}C напоминают оценки, сделанные для других летучих радионуклидов [14]. Максимальная интенсивность выброса имела место в течение первых трех дней после аварии, затем начала снижаться и к 5 мая достигла второго максимума (рис. 7) [14]. Полученная оценка суммарного выброса за этот период составляет 50 ТБк.

Посуточные выбросы ^{14}C , ТБк

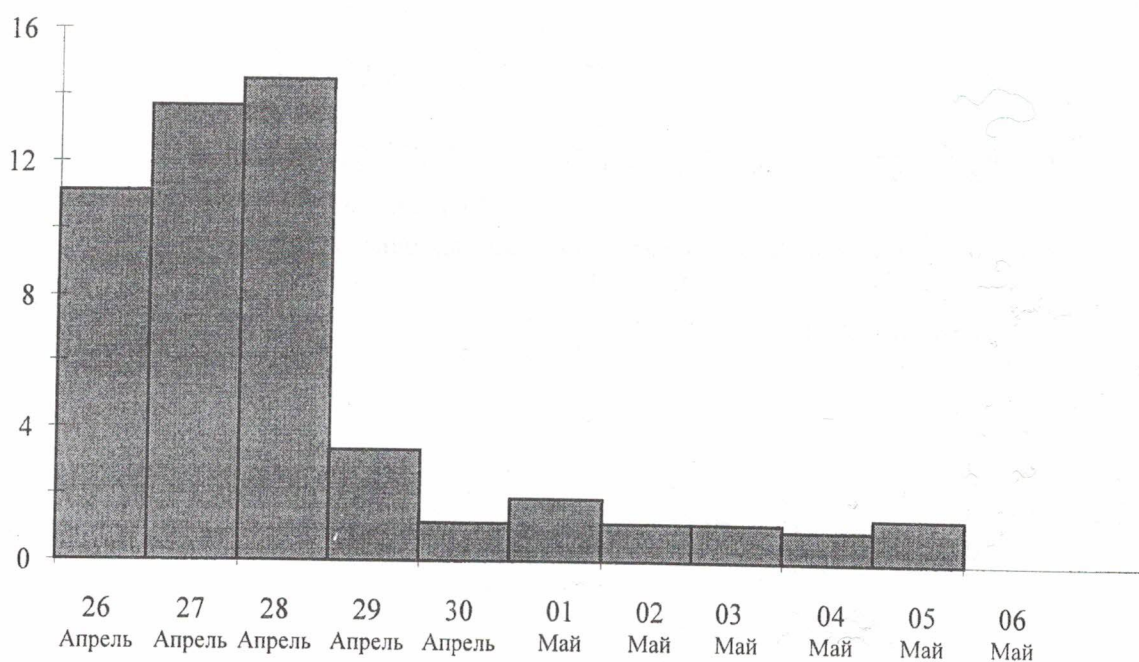


Рис. 7. Оценки суточных выбросов ^{14}C (ТБк) в начальный период Чернобыльской аварии.

Оценки баланса ^{14}C в аварийном выбросе Чернобыльской АЭС. Во время активной стадии аварии большая часть графита сгорела, часть графита диспергировала в результате взрыва и была выброшена за пределы реактора, а остальная его часть - около 700 т (что составляет 38 %) - в настоящее время находится внутри объекта «Укрытие». В работе [22] дана оценка накопления ^{14}C в активной зоне реактора 4-го блока Чернобыльской АЭС перед аварией, что составляет 100 ТБк. В работе [23] приводится оценка скорости наработки ^{14}C для реакторов РБМК-1000, используемых на Чернобыльской АЭС, равная

33000 ГБк/ТВт(Э) в год. Исходя из этого значения, при среднем по зоне выгорании, равном $10,9 \text{ МВт} \cdot \text{сут} \cdot \text{кг}^{-1}$ (по урану), и периоде кампании реактора 570 сут оценка накопления ^{14}C составляет 187 ТБк [14]. В соответствии со сценарием А. А. Борового значительная часть графита сгорела за время активного этапа аварии, часть графита в виде мелкодиспергированной пыли была выброшена за пределы реактора и депонирована в окружающей среде. Около 700 т графита осталось в реакторе [24]. Указанные два значения рассматриваются в данной работе как нижняя и верхняя оценки суммарной активности ^{14}C в реакторе 4-го блока Чернобыльской АЭС. Соответственно диапазон оценок активности для той части ^{14}C , которая находится в разрушенном реакторе, составляет от 38 до 68 ТБк. Используя полученную при решении обратной задачи атмосферного переноса оценку вклада газообразной компоненты ^{14}C , составляющую 50 ТБк, получим, что на долю аэрозольной компоненты аварийного выброса ^{14}C приходится от 12 до 62 ТБк [14].

Оценка величины ^{14}C штатных выбросов ЧАЭС проведена в [16]. Выбросы $^{14}\text{CO}_2$ составили до $3,3 \text{ ТБк} \cdot \text{год}^{-1}$ или до 20,8 ТБк за время работы АЭС до 1996 г. включительно.

Выводы

Установлено, что выбросы ^{14}C завода по переработке отработавшего топлива Томск-7 составили до 30 (45) ТБк ежегодно с 1985 по 1988 г. и до 450 (620) ТБк за время работы 1959 - 1993 гг.

Штатные выбросы Запорожской АЭС составляли до 2,2 ТБк ежегодно за время 1985 - 1993 гг.

Штатные выбросы $^{14}\text{CO}_2$ Чернобыльской АЭС составляли до 3,3 ТБк в год или до 20,8 ТБк за время работы станции до 1996 г.

Аварийные выбросы $^{14}\text{CO}_2$ Чернобыльской АЭС составили до 50,0 ТБк, в то время как на долю аэрозольной компоненты выброса ^{14}C приходится от 12 до 62 ТБк. Два приведенных значения соответствуют двум оценкам наработки ^{14}C в реакторе за время кампании.

Таким образом, штатные выбросы $^{14}\text{CO}_2$ АЭС не превышают $2,2 - 3,3 \text{ ТБк} \cdot \text{год}^{-1}$, в то время как соответствующие выбросы завода по переработке отработавшего топлива Томск-7 сопоставимы с аварийными выбросами Чернобыльской АЭС.

Годичные слои дерева дают усредненную информацию о содержании ^{14}C в воздухе за вегетационный период, что позволяет реализовать ретроспективный метод восстановления картины колебаний ^{14}C за вегетационный период.

Колебания плотности древесины в течение года и применение для анализов деревьев с широкими годичными слоями позволяют проводить разделение древесины детально до четырех подслоев из одного годичного слоя. Это дает возможность локализовать колебания ^{14}C по каждой из частей годичного слоя и периода вегетативного периода года в воздухе соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Otlet R.L., Fulker M.J., Walker A.J. Environmental impact of atmospheric carbon-14 emissions resulting from the nuclear energy cycle. – 1992. – P. 519 - 534.
2. Bush, R.P., White I.F., Smith G.M. Carbon-14 Waste management. AERE-R10543. - 1983.
3. McCartney M., Scott E.M. Carbon-14 Discharges from the Nuclear Fuel Cycle: 1. Global Effects // J. Environ. Radioactiv. – 1988. – No. 8. – P. 143 - 155.
4. McCartney M., Scott E.M. Carbon-14 Discharges from the Nuclear Fuel Cycle: 2. Local Effects // Ibidem. – P.157 - 171.
5. Kovalyukh N., Skripkin V., Awsyuk R. et al. Dendroradioecology of vicinity of Nuclear Fuel Reprocessing Plant Tomsk-7 // Extended Abstracts International isotope society, University of Wroclaw, 1994. Isotope Workshop II. 25 - 27 May, 1994. – P. 83 - 85.
6. Buzinny M., Likhtarjov I., Los' I. et al. Ecological chronology of nuclear fuel cycle sites // Prehistorie Europeene. – No. 6. – P. 197 - 222.

7. Buzinny M., Kovaluch N., Likhtarjov I., et al. Ecological chronology of nuclear fuel cycle sites // Proc. of 15th Intern. 14C Conf. / Ed. by G.T. Cook, D.D. Harkness, B.F. Miller, E.M. Scott. RADIOCARBON, 1995. - Vol. 37, No. 2. - P. 469 - 473.
8. Kovalyukh N., Skripkin V., Buzinny M. et al. Zapis emisiji radiowegia z zakladow przerobczych paliva jądrowego Toms-7 w slojach rocznych przyrostow drzew // Matematyka-Fizykaz. 79 Geochronometria. - 1996. - No. 13. - P. 157 - 165. (In Polish)
9. Соботович Э.В., Ковалюх Н.Н., Чебаненко С.И. Дендрорадиоэкология в зоне влияния Чернобыльской АЭС // Принципы и методы ландшафтно-геохимических исследований миграции радионуклидов. - М., 1989. - С. 125.
10. Бузинний М.Г., Лось И.П., Зеленский А.В. и др. О возможной корреляции уровней С-14 в растительности с I-131 в щитовидной железе после аварии на ЧАЭС // Актуальные проблемы ликвидации медицинских последствий аварии на Чернобыльской АЭС: Тез. докл. Украинской науч.-практ. конф., Киев, 20 - 22 апр. 1993 г. - Киев: МЗ Украины, Украинский научный центр радиационной медицины, 1993. - Ч. I. - С. 48 - 49.
11. Бузинний М.Г., Зеленский А.В., Ковалюх Н.Н. и др. Ретроспективное восстановление уровня аварийного выброса ¹⁴С в атмосферу вследствие аварии на Чернобыльской АЭС // Материалы науч. конф. "Актуальные вопросы ретроспективной, текущей и прогнозной дозиметрии облучения в результате Чернобыльской аварии", Киев, 27 - 29 окт. 1992 г. - Киев, 1993. - С. 118 - 124.
12. Ковалюх Н.Н., Скрипкин В.В., Соботович Э.В. и др. Радиоуглерод аварийного выброса Чернобыльской АЭС в годовых кольцах деревьев в окрестностях ЧАЭС // Zeszyty naukowe Politechniki Slaskiej. Seria: Matematyka-Fizyka. - Z. 71, №. kol. 1229. - P. 214 - 224. (In Russian)
13. Аварийный выброс радиоуглерода в результате аварии на Чернобыльской АЭС и связанные с ним проблемы / М.Г. Бузинний // Проблеми зони відчуження. - 1996. - Вип. 4. - С. 91 - 95.
14. Buzinny M., Likhtarjov I., Los' I. et al. Radiocarbon Analysis of Annual tree rings from the Vicinity of the Chernobyl NPP // Proc. of the 16th Intern. Radiocarbon Conference / Ed. by W.G. Mook, J. Van der Plicht. RADIOCARBON, 1998. - Vol. 40, No. 1. - P. 373 - 380.
15. Ретроспективные исследования радиоуглерода аварийных выбросов Чернобыльской АЭС / М.Г. Бузинний, Н.Н. Талерко // Гигиена населенных мест. - 2000. - Вып. 36. - Ч. 1. - С. 246 - 260.
16. Штатні викиди радіовуглецю Чорнобильської АЕС. / М.Г. Бузинний, Н.Н. Талерко // Там же. - С. 234 - 242.
17. Бузинний М.Г., Ковалюх Н.Н., Лось И.П., Скрипкин В.В. Радиоуглеродные выбросы Запорожской АЭС // Тез. докл. науч.-практ. конф., Киев, 25 - 26 апр. 1994 г. - Киев: Научный центр радиационной медицины АМН Украины. - 1994. - Т. 1. - С. 102 - 103.
18. Buzinny M., Kovalyukh N., Los' I., Skripkin V. Radiocarbon releases of Zaporozhye NPP // Conference of geochronology and dendrochronology of old town's and radiocarbon dating of archeological findings. Lithuania, Vilnius, Oct. 31 - Nov. 4, 1994. Abstracts and Papers. - Vilnius University Press, 1994. - P. 7 - 12.
19. Buikov M. V., Garger E. K., Talerko N. N. Research into the formation of spotted pattern of radioactive fallout with the Lagrangian-Eulerian model // Meteorologiya i gidrologiya. - 1992. - No. 12. - P. 33 - 45.
20. Kaimei D., Youneng Q., Fan C. Bomb-produced ¹⁴С in tree rings / Ed. by A. Long, R. Kra // Proc. of the 14th Intern. ¹⁴С Conf. Radiocarbon. - 1992. - No. 34(3). - P. 753 - 756.
21. Schwibach J., Riedel H., Bretschneider J. Untersuchungen uber die Emission von Kohlenstoff-14 Verbindungen aus kerrntechnischen Anlagern. Dietrich Reimer Verlag. STN Berichte. Institut fur Strahlen Hygiene des Bundes Gesundheitsamtes. - 1979. - No. 20. - 139 s.
22. Бегичев С.Н., Боровой А.А., Булаков Е.В. и др. Топливо 4-го энергоблока ЧАЭС (Краткий справочник). - М., 1990. - 21 с. - (Препр. / Ин-т атомной энергии; 5268/3).
23. Salonen L. Carbon-14 and Tritium in Air in Finland after the Chernobyl Accident // Radiochimica Acta. - 1987. - Vol. 41. - P. 145 - 148.
24. Состояние ядерной, радиационной и экологической безопасности объекта "Укрытие": (Отчет) / РНЦ "Курчатовский институт"; Ответств. исполн. А. А. Боровой. - М., 1995.

РІВНІ ВИКИДІВ РАДІОВУГЛЕЦЮ ОБ'ЄКТІВ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ НА ТЕРИТОРІЇ КОЛИШНЬОГО СРСР

М. Г. Бузинний

Проведено порівняння величини викидів ¹⁴С у формі CO₂ (¹⁴CO₂) різних об'єктів паливно-енергетичного комплексу – заводу з переробки відпрацьованого палива (Томськ-7, Росія), найбільшої в Україні Запорізької АЕС (штатні викиди) і Чорнобильської АЕС (аварійні та штатні викиди). Для

визначення величини викидів проводилися дослідження рівня ^{14}C у річних шарах сосни. Вимірювання зразків проводилися на сучасному РС спектрометрі Quantulus 1220TM. Для вимірювань готувалися зразки бензолу з додаванням сцинтиляторів PPO 4,0 г · л⁻¹ і POPOP 0,1 г · л⁻¹. Величину викидів $^{14}\text{CO}_2$ оцінено для Томська-7 до 30 (45) ТБк щорічно в 1985 - 1988 рр. чи 450 (620) ТБк за час роботи з 1959 по 1993 р. Викиди $^{14}\text{CO}_2$ Запорізької АЕС складають до 2,2 ТБк щорічно, штатні викиди $^{14}\text{CO}_2$ Чорнобильської АЕС - до 3,3 ТБк за рік або до 20,8 ТБк за час роботи станції до 1996 р. Аварійні викиди $^{14}\text{CO}_2$ Чорнобильської АЕС склали до 50,0 ТБк. Частка аерозольної компоненти аварійного викиду ^{14}C становить від 12 до 62 ТБк.

RADIOCARBON RELEASE LEVELS OF NUCLEAR FUEL ENERGETIC COMPLEX SITES ON THE FORMER SOVIET UNION TERRITORY

M. G. Buzinny

Radiocarbon releases in the form of CO_2 ($^{14}\text{CO}_2$) for different sites of nuclear fuel energetic complex on the territory of former Soviet Union were observed in comparison - Fuel reprocessing plant (Toms-7, Russia), the greatest on the territory of Ukraine Zaporozhje NPP (operational releases) and Chernobyl NPP (operational and accidental releases). Radiocarbon concentration was examined in tree rings of pine tree. Samples was measured using modern LS spectrometer Quantulus 1220TM. Benzene samples were counted adding PPO 4,0 g · L⁻¹ and POPOP 0,1 g · L⁻¹ as scintillation agent. Releases value of $^{14}\text{CO}_2$ was estimated for Toms-7 up to 30 (45) TBq annually since 1985 to 1988 or 450 (620) TBq for operation period of 1959 to 1993. Releases of $^{14}\text{CO}_2$ for Zaporozhje NPP was estimated to be up to 2,2 TBq annually. $^{14}\text{CO}_2$ releases of Chernobyl NPP was estimated to be up to 3,3 TBq annually or up to 20,8 TBq for operation period till 1996. Chernobyl NPP accidental $^{14}\text{CO}_2$ releases fraction was estimated to be 50,0 TBq. Aerosol fraction of radiocarbon accidental release at Chernobyl NPP was estimated from 12 to 62 TBq.

Поступила в редакцию 16.10.02,
после доработки – 15.01.03.