

Газовый поток, поступающий в источник, м ³ ·Па/с	4,0·10 ⁻²
Энергия пучка, кэВ	95
Напряжение на первом электроде относительно земли, кВ	-24
Нагрузка высоковольтного выпрямителя инжектора, А	1,3
Диаметр отверстия в конусе коллиматора, мм	50
Вакуум в инжекторе, Па	2,7·10 ⁻³

При включении высокочастотных резонаторов ускорителя в токоприемнике регистрировали ток протонов 0,25 А энергией 500 кэВ.

В заключение авторы выражают благодарность всем участникам этой работы, в особенности М. А. Никитину, К. Н. Никитину, А. С. Скворцову, Е. Н. Князеву, О. А. Гусеву, Ю. Г. Генделю,

О. Г. Матвеевко, а также руководителю работ по запуску и исследованию ускорителя А. П. Федотову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шембель Б. К. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 1, с. 45.
2. Lamb W., Lofgreen E. «Rev. Sci. Instrum.», 1956, v. 27, N 11, p. 907.
3. Демирханов Р. А. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1964, № 2, с. 19.
4. Плешивцев Н. В. и др. Там же, 1967, № 6, с. 23; «Атомная энергия», 1967, т. 22, вып. 2, с. 128.
5. Lawrence E. «Science», 1955, v. 122, N 3180, p. 1127.
6. Габович М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов. М., Атомиздат, 1972.
7. Ковальский Г. А. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1968, № 5, с. 47.

Поступила в Редакцию 30.11.79

УДК 621.039.58:539.16.01

Вопросы радиационной опасности ¹⁴С

ВАСИЛЕНКО И. Я., БУГРЫШЕВ П. Ф., ИСТОМИНА А. Г., НОВОСЕЛЬЦЕВА В. И.

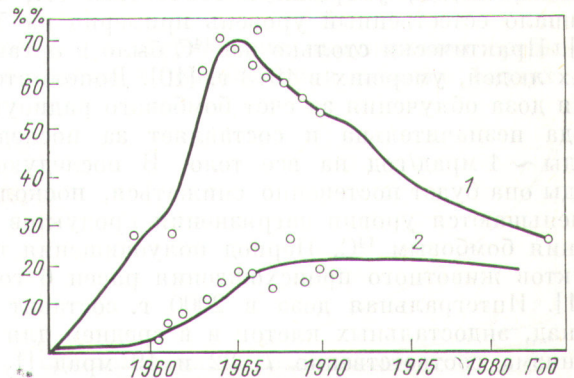
Ядерные взрывы, общая мощность которых достигла 530 Мт, сопровождались образованием значительного количества радиоуглерода — ¹⁴С, характеризующегося большим периодом полураспада (5760 лет) и низкой энергией β-излучения (0,156 МэВ). Максимальная концентрация этого нуклида в атмосфере зарегистрирована в 1965 г., когда его уровень превысил естественный фон примерно на 100%. Общее количество накопленного радиоуглерода в 1972 г. составило 5,8 МКи [1,2]. В результате ограничения воздушных ядерных взрывов концентрация «бомбового» ¹⁴С в атмосфере постепенно снижается. Однако она все еще превышает естественный уровень примерно на 30%. К 2000 г. ожидается снижение до 3% (рис. 1).

В настоящее время основным источником всевозрастающего поступления ¹⁴С в окружающую среду являются предприятия ядерной энергетики. По обобщенным данным, выброс газообразного ¹⁴С из энергетических реакторов составляет сотые доли Ки/[МВт (эл.)·год] [3]. При этом ~ 95% ¹⁴С находится в виде ¹⁴СО₂, 2,5% — в виде ¹⁴СО и 2,5% — в виде гидрокарбонатов [4]. К 2000 г. такое положение может привести к повышению концентрации радиоуглерода в атмосфере примерно на 200% (рис. 2). Следует отметить, что увеличение [5, 6] содержания стабильного углерода в атмосфере вследствие сжигания минерального топлива приводит к некоторому снижению концентрации ¹⁴С в результате его разбавления.

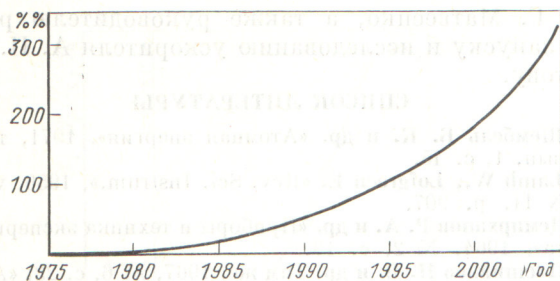
Процессы обмена ¹⁴С между атмосферой, биосферой и гидросферой протекают достаточно интенсивно, характеризуясь временными константами порядка нескольких лет. Период полуочищения атмосферы предполагают равным 1,5—5 годам [1, 2]. В конечном счете основное количество радио-

углерода поступает в Мировой океан, который выполняет роль своеобразного «буфера» и где, вступая в реакции с металлами, ¹⁴С образует карбонаты и бикарбонаты. Временная константа обмена поверхностных слоев океана составляет ~ 5—25 лет, а глубоких — 100—1000 лет. Считают, что полный обмен ¹⁴С в атмосфере, как и стабильного углерода, происходит за 300—500 лет.

В процессе фотосинтеза ¹⁴С накапливается в растениях, а затем в организме животных и людей. При этом наземные растения фиксируют лишь 1/10 часть радиоуглерода, остальные 9/10 поглощаются морскими растениями, главным образом фитопланктоном. Коэффициент перехода в цепи атмосфера — наземные растения равен 1 [7]. Равновесие устанавливается очень быстро, через 2—3 мес. В растения радиоуглерод может поступать в небольшом количестве также из почвы



Р и с. 1. Содержание «бомбового» ¹⁴С в атмосфере (1) и поверхностном слое океана (2) [1, 2]. По оси ординат на рисунках 1, 2 отложено избыточное количество ¹⁴С по сравнению с естественным содержанием



Р и с. 2. Ожидаемая в 2000 г. концентрация ^{14}C в атмосфере за счет выбросов предприятий ядерной энергетики [5, 9]

через корневую систему. Содержание ^{14}C в организме животных коррелирует с прошлогодним содержанием его в растениях [8]. В 1963—1964 гг. концентрация радионуклида в растениях повысилась примерно в 2 раза по сравнению с естественным уровнем [9]. Вблизи источников выброса концентрация ^{14}C в атмосфере выше средней, что приводит, естественно, к повышенному накоплению радиоуглерода в растительных и животных организмах в этих зонах. Так, растения, находящиеся на расстоянии 1—2 км от трубы АЭС, содержат ^{14}C на 50—90% больше, чем находящиеся на расстоянии 20—30 км [6]. Следовательно, могут создаваться локальные очаги загрязнения радиоуглеродом.

В организм людей радиоуглерод поступает с продуктами питания растительного и животного происхождения и водой в виде различного рода органических и неорганических соединений, а также с воздухом в виде $^{14}\text{CO}_2$. Накопление радиоуглерода в растениях в процессе фотосинтеза — основное звено в биологической цепочке, по которой ^{14}C поступает с пищей в организм людей.

Поступление искусственного радиоуглерода в атмосферу приводит к повышению его содержания в организмах людей. Так, количество ^{14}C в организмах людей, умерших в 1964—1965 гг., превышало естественный уровень примерно на 50% [9]. Практически столько же ^{14}C было в организмах людей, умерших в 1973 г. [10]. Дополнительная доза облучения за счет бомбового радиоуглерода незначительна и составляет за последние годы ~ 1 мрад/год на все тело. В последующие годы она будет постепенно снижаться, поскольку уменьшаются уровни загрязнения продуктов питания бомбовым ^{14}C . Период полуочищения продуктов животного происхождения равен 6 годам [11]. Интегральная доза в 2000 г. составит для гонад, эндостальных клеток и в среднем для организма соответственно 7, 22 и 19 мрад [1, 2]. За все время жизни ^{14}C его интегральная доза значительно превысит дозы от других радионуклидов продуктов деления. Она будет создаваться в течение тысяч лет. Отметим, что доза облучения

всего тела за счет естественного радиоуглерода равна ~ 1,2 мрад/год и составляет ~ 1% дозы фонового облучения. Дозы облучения за счет выбросов ^{14}C предприятиями ядерной энергетики постепенно повышаются (рис. 3).

При оценке биологических аспектов глобального загрязнения природных сред радиоуглеродом следует иметь в виду, что углерод является одним из основных биогенных элементов и входит в состав всех живых тканей (жиров, белков, углеводов, нуклеиновых кислот, ферментов, витаминов и других биологически важных соединений), являясь внутренним облучателем биомолекул. В процессе обмена радионуклид перемещается из одного класса соединений в другой.

Биологическое действие радиоуглерода связывают не только с радиационными эффектами, т. е. процессами ионизации и возбуждения атомов и молекул β -частицами при распаде ^{14}C и образованием высокоактивных в биохимическом отношении радикалов, но и с химическим действием в результате преобразований распавшихся атомов углерода в атомы азота [$^{14}\text{C} (n, p) \rightarrow ^{14}\text{N}$]. Фактор трансмутации (изменения химической природы атомов и молекул) приобретает особое значение, если радиоуглерод включен в молекулу, повреждение которой определяет биологический эффект. Локальные изменения химического состава ДНК (превращение ^{14}C в ^{14}N) приводят к генным и хромосомным мутациям, которые не восстанавливаются. Вероятность повреждений за счет β -частиц, образующихся при распаде ^{14}C , неизмеримо меньше [12]. Отметим, что репарирующие ферменты в большинстве случаев восстанавливают одиночные разрывы ДНК, вызванные радиационными эффектами. Двойные разрывы восстанавливаются с большим трудом. Мутации в половых клетках, если они не приводят к их гибели, могут проявиться у потомков в форме отклонений от нормального развития, а также в виде наследственных болезней. Мутации в соматических клетках могут в отдаленные сроки вызвать различные нарушения, в том числе злокачественные новообразования.

На возможность повышенного мутагенного действия инкорпорированного ^{14}C впервые обратил внимание Паулинг [13]. Многие исследователи придают большое значение трансмутационному действию радиоуглерода, считая, что биологическая эффективность на единицу поглощенной дозы повышается [14—17]. Следует, однако, особо отметить, что МКРЗ, проанализировав результаты этих и других исследований, рекомендовала принять ОБЭ ^{14}C равной 1. К такому же заключению пришли НКДАР ООН, Национальная Академия наук США [18] и Национальная комиссия радиационной защиты СССР [19].

В оценке биологического действия радиоуглерода важное значение придается исследованию ки-

нетики обмена нуклида. Необходимость проведения таких исследований обусловлена тем, что особенности обмена различных соединений радиоуглерода не всегда учитывают при его нормировании [19, 21]. Только в Публикации 10 МКРЗ обращено внимание на особенности обмена некоторых соединений ^{14}C (бикарбонат, глицин, ацетат). Эти соединения, однако, не являются основным источником вклада радиоуглерода в рацион человека.

В наших исследованиях [22, 23] в сравнительном плане изучена кинетика обмена основных неорганических и органических соединений радиоуглерода, входящих в состав углеводов, белков и жиров, а также спиртов. Неорганические соединения $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$, $\text{K}_2^{14}\text{CO}_3$, $\text{Ca}^{14}\text{CO}_3$ характеризуются высокой всасываемостью (90—100%), относительно равномерным распределением ^{14}C в органах и тканях и быстрым выведением из организма, в основном через легкие в форме $^{14}\text{CO}_2$. В течение первого часа у крыс выводится через легкие 77, 79 и 35% введенного количества радиоуглерода в виде названных соединений. И концу суток в организме остаются лишь 1—3% введенного ^{14}C . Органические соединения (^{14}C — глюкоза, ^{14}C — янтарная кислота, ^{14}C — глицин, ^{14}C — пальмитиновая кислота, ^{14}C — этиловый спирт, ^{14}C — метиловый спирт) характеризуются также высокой всасываемостью (95—100%) и относительно равномерным распределением ^{14}C в органах и тканях. Из организма радиоуглерод выделяется в основном через легкие, однако медленнее по сравнению с неорганическими соединениями, ибо ^{14}C этих соединений используется как энергетический и пластический материал. Через сутки в организме крыс содержалось примерно 15, 50, 60, 10, 12 и 34% активности соответственно при введении ^{14}C — глюкозы, ^{14}C — глицина, ^{14}C — пальмитиновой кислоты, ^{14}C — янтарной кислоты, ^{14}C — этилового спирта и ^{14}C — метилового спирта. В начальный период большую концентрацию ^{14}C регистрировали в органах и тканях с высоким уровнем обмена (печень, почки, желудочно-кишечный тракт), в последующем — в жировой и костной тканях.

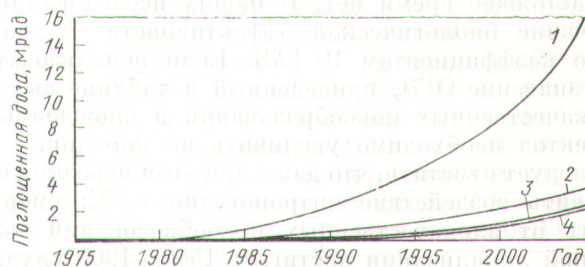
При одновременном поступлении радиоуглерода равновесное состояние у крыс наступало через месяц с начала введения $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$, три месяца с начала введения ^{14}C — глюкозы и четыре месяца после начала введения ^{14}C — глицина и ^{14}C — пальмитиновой кислоты. К этому сроку в организме накапливалось соответственно 7; 200; 1200 и 1300 ежедневно вводимого количества радиоуглерода. Особенности обмена различных соединений радиоуглерода сказались на темпе и значении формируемых доз облучения. При введении органических соединений дозы облучения органов и тканей в десятки раз больше, чем при поступлении неорганических соединений ^{14}C .

При экстраполяции полученных экспериментальных данных можно считать, что у человека при получении ^{14}C в составе стандартного рациона равновесное состояние наступает через 1,5 года с начала поступления радиоуглерода при кратности накопления ~ 30 (отношение содержания радиоуглерода в организме к ежедневно поступающему). Эти значения находятся в хорошем соответствии с рекомендациями НКДАР, согласно которым время равновесного состояния составляет 1,4—1,8 года [1, 2], а кратность накопления ^{14}C согласуется с кратностью накопления стабильного углерода и радиоуглерода естественного происхождения (соответственно 30—40 и 30—33). Характер облучения зависит от формы соединения, в составе которого радиоуглерод поступает в организм. При поступлении ^{14}C в составе рациона максимальные дозы формируются в жировой ткани и костном мозге (желтом) и примерно в 4 раза превышают среднюю дозу облучения тела.

Дозы облучения, обусловленные антропогенным радиоуглеродом, дают незначительный вклад в дозу фоновой облучения. Эффект малых доз носит стохастический характер и может проявиться, главным образом, в различного рода генетических нарушениях (отклонение от нормального развития и наследственные болезни) и злокачественных новообразованиях. Опасность риска для общества возрастает с увеличением числа лиц, облучаемых в популяции. МКРЗ и НКДАР при оценке риска рекомендуют исходить из концепции беспорогового действия радиации и линейного соотношения доза — эффект. При этом подчеркивается, что любое облучение, не являющееся необходимым, не должно иметь места. Такой подход является наилучшей гарантией надежности радиационной защиты человека.

Результаты оценок возможных генетических и соматических последствий загрязнения внешней среды ^{14}C представлены в таблице. При этом были использованы следующие исходные предположения:

глобальное загрязнение окружающей среды и установившееся равновесие в цепочке воздух —



Р и с. 3. Предполагаемые дозы облучения за счет выбросов ^{14}C предприятиями ядерной энергетики: 1 — жировая ткань; 2 — все тело; 3 — костный мозг; 4 — гонады

19. **Нормы радиационной безопасности НРБ—76.** М., Атомиздат, 1978.
20. **Рекомендации Международной Комиссии по защите от излучений.** М., Изд-во иностр. лит., 1958.
21. **Радиационная защита.** Рекомендации Международной Комиссии по радиологической защите (вторая публикация). М., Госатомиздат, 1964.
22. **Василенко И. Я. и др.** В кн.: Радиоэкология животных. Материалы I Всесоюз. конф. М., «Наука», 1977, с. 203.
23. **Василенко И. Я. и др.** В кн.: Тезисы Всесоюз. конф. «Отдаленные последствия и оценка риска воздействия радиации». М., 1978, с. 61.
24. **Beal J., Scully N.** «Bot. Gas.», 1950, v. 112, p. 232.
25. **Suomolainen E., Jurpeinen O., Niini R.** «Nature», 1956, v. 178, N 4529, p. 337.
26. **McQuade H., Friedkin M., Atchison A.** «Exptl Cell Res.», 1956, v. 11, N 2, p. 249.
27. **Purdon C.** «Mutacion Res.», 1965, v. 2, N 2, p. 156.
28. **Скобкин В. С., Мишеева Л. А.** «Генетика», 1965, т. 1, № 3, с. 97.
29. **Плущенник Г.** «Генетика», 1966, т. 2, № 5, с. 117.
30. **Oliver R.** In: Biological effects of transmutation and decay of incorporated radioisotopes. Vienna, IAEA, 1968, p. 165.
31. **Apelgot S.** Ibid., p. 147.
32. **Заболеласность населения СССР злокачественными новообразованиями и смертность от рака.** М., «Медицина», 1970.
33. **The Effects on Populations of Exposure to Low-Levels of Ionizing Radiation.** National Academy of Sciences. National Research Council. Washington, 1972.
34. **Дубинин Н. П.** Эволюция популяций и радиация. М., Атомиздат, 1966.
35. **Дубинин Н. П.** Общая генетика. М., «Наука», 1976.

Поступила в Редакцию 28.09.79

УДК 539.1.551.4

Оперативный метод изучения ^3H в океане и атмосфере в судовых условиях

СОЙФЕР В. Н., БОРОУХИН Е. А., ГОРЯЧЕВ В. А., ПОЗДЕБЕВ Ю. С., СЕРГЕЕВ А. Ф.

Важное место в реализации долгосрочных комплексных программ изучения циркуляции и перемещения водных масс в Мировом океане отводится применению радиоактивных индикаторов, таких, как ^3H , ^{14}C , ^{226}Ra , ^{137}Cs [1].

Тритий (НТО) наряду с дейтерием и ^{18}O является наиболее перспективным индикатором движения водных масс и используется при изучении процессов циркуляции и водообмена мезомасштабного характера (массообмен через термоклин, взаимодействие атмосферы с подстилающей водной поверхностью, явления опускания и подъема водных масс). Представляется перспективным его использование и в исследованиях вихреобразования в океане.

Недостатком измерений ^3H и ^{14}C , проводимых в последнее время (например, Скриповским институтом океанографии), был разрыв в несколько лет [2] между отбором значительных по объему проб на отдельных станциях и трудоемкой технологической обработкой их после доставки в береговые лаборатории. Это исключало возможность оперативного использования тритиевого и радиоуглеродного методов при работе на полигонах в океане. Кроме того, возникали дополнительные трудности по сохранению проб глубинных вод с ультранизким содержанием ^3H от загрязнения их ^3H атмосферной влаги при анализе на суше, где концентрация ^3H на 1—2 порядка выше, чем в атмосфере над поверхностью океана.

Резкие изменения гидрометеорологических условий в пограничной зоне атмосферы приводят к значительным вариациям коэффициента турбулентного обмена влагой. Поэтому для корректного решения задач по влагообмену на изучаемой

акватории необходимы непосредственные измерения трития на судне во время экспедиционных работ. Наблюдаемая изменчивость концентрации трития на вертикальных разрезах исследуемого района океана имеет, как правило, непредсказуемый характер. Получение предварительных оперативных данных о поле трития конкретного района в ходе экспедиции позволит планировать исследования в течение всего рейса. Очевидно, что в данном случае не только экономятся время и значительные материальные средства, но и появляется возможность для проведения уникальных экспериментов по изучению циркуляции и перемещения водных масс в океане, а также влагообмена на границе атмосфера — океан.

Наличие тритиевой лаборатории в составе измерительного комплекса на научно-исследовательском судне (НИС) позволяет сократить до нескольких суток время от момента отбора пробы до получения результата, а также уменьшает опасность загрязнения глубинных проб атмосферной влагой как при хранении, так и при обработке.

В 1971 г. на НИС «Академик Курчатов» был проведен первый опыт радиометрии ^3H в судовых условиях, положенный в основу разработанной в Тихоокеанском океанологическом институте (ТОИ) ДВНЦ АН СССР судовой тритиевой лаборатории, предназначенной для работы в экспедиционных условиях по комплексным программам изучения океана и атмосферы с использованием тритиевого и, в перспективе, радиоуглеродного методов.

К сожалению, ультранизкий уровень радиоактивности ^3H в океане и особенности техники его измерений не позволяют проводить непрерыв-