

Д. Г. ФЛЕЙШМАН, Ю. П. КАНЕВСКИЙ

КОСМОГЕННЫЙ Na^{22} В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ СУШИ

(Представлено академиком Е. М. Кренсом 8 VI 1970)

Среди космогенных радионуклидов, образующихся в земной атмосфере, по-видимому, лишь H^3 ($T_{1/2} = 12,3$ лет) и Na^{22} ($T_{1/2} = 2,6$ лет) как по продолжительности жизни, так и по химическим свойствам являются наиболее пригодными естественными метками для исследования гидрологических процессов в природных условиях. Пригодность трития для этой цели не вызывает сомнений, так как он метит непосредственно молекулы воды. В то же время известно, что из всех катионов, присутствующих в природных водах, ионы натрия наиболее устойчивы в растворе (^{1, 2}), поэтому можно ожидать, что роль сорбционных и ионнообменных процессов в удалении Na^{22} из раствора незначительна и радиоактивный распад этого радионуклида должен быть практически единственной причиной, уменьшающей его концентрацию в поверхностных водах.

Оценим концентрацию Na^{22} (ат/л) в атмосферных осадках n_{oc} , речных n_p и озерных $n_{оз}$ водах, считая известными скорость его образования N (ат/км²·сек) и столбе воздуха над единицей площади земной поверхности и среднее время пребывания в атмосфере τ_a , а также гидрологические параметры исследуемых водоемов.

Атмосферные осадки. Средняя за длительный период времени концентрация Na^{22} в атмосферных осадках определяется формулой

$$n_{oc} = Ne^{-\lambda\tau_a}/P, \quad (1)$$

где P — средняя интенсивность атмосферных осадков (л/км²·сек), λ — константа распада Na^{22} .

Безозерные реки. Выпавшие на поверхность Земли осадки частично испаряются, что приводит к повышению концентрации Na^{22} в поверхностных водах по сравнению с атмосферной влагой. Чтобы учесть влияние испарения, необходимо заменить в формуле (1) среднюю интенсивность атмосферных выпадений P на модуль стока M (л/км²·сек) с данной территории. Кроме того, следует ввести поправку на время задержки воды в бассейне реки τ_0 (считая с момента выпадения из атмосферы).

Таким образом, для безозерных рек

$$n_p = Ne^{-\lambda(\tau_a + \tau_0)}/M. \quad (2)$$

Озера и озерные (вытекающие из озер) реки. Влияние распада Na^{22} на концентрацию этого радионуклида в поверхностных водах наиболее заметно для озер и озерных рек, особенно в тех случаях, когда объем воды озера V существенно превышает ее годовой расход Q , т. е. «время смены воды» $T_{оз} = V/Q$ достаточно велико по сравнению с периодом полураспада Na^{22} . Чтобы учесть «старение» воды в озере, введем коэффициент $K = f(T_{оз})$ в формулу (2). Тогда

$$n_{оз} = KNe^{-\lambda(\tau_a + \tau_0)}/M. \quad (3)$$

Для расчета «коэффициента старения» K будем предполагать, что время полного перемешивания воды в озере мало по сравнению с периодом

полураспада Na^{22} , т. е. происходит непрерывное перемешивание вновь поступающего и всего находящегося в озере Na^{22} . В этом случае

$$K = \frac{1}{T_{\text{оз}}} \int_0^{T_{\text{оз}}} e^{-\lambda t} dt = (1 - e^{-\lambda T_{\text{оз}}}) / \lambda T_{\text{оз}}; \quad (4)$$

и

$$n_{\text{оз}} = N(1 - e^{\lambda T_{\text{оз}}}) e^{-\lambda(\tau_a + \tau_e)} / M \lambda T_{\text{оз}}. \quad (5)$$

Формула (5) является общим выражением как для озерных, так и для безозерных (если $T_{\text{оз}} = 0$, $K = 1$) рек. Однако следует помнить, что она справедлива лишь для простой модели: безозерный бассейн — озеро — река. В случае сложных озерно-речных систем целесообразно расчленять сложную систему на более простые, а концентрацию Na^{22} на выходе сложной системы рассчитывать с учетом относительных вкладов каждой из простых систем.

Удобный объект для экспериментальной проверки полученных соотношений — система великих озер Европы (бассейн р. Невы), гидрологические характеристики которой хорошо изучены (³⁻⁶). Входящие в систему озера Онежское ($V = 295 \text{ км}^3$), Сайма ($V = 75 \text{ км}^3$) и Ильмень ($V \approx 3 \text{ км}^3$) соединены с Ладожским озером ($V = 908 \text{ км}^3$) реками Свирью, Вуоксой и Волховым, среднегодовой расход которых составляет соответственно 19,3; 18,7 и 18,2 км^3 . На долю этих трех главных притоков Ладожского озера приходится 70% всей поступающей в него воды. Вклад атмосферных осадков в водный баланс Ладожского озера составляет 13%, а оставшаяся часть обеспечивается малыми реками (15%) и подземным притоком (2%). Средний годовой расход Ладожского озера равен 79,8 км^3 , из них 92,4% выносит р. Невы, а 7,6% тратится на испарение. Остальные гидрологические параметры, необходимые для теоретической оценки концентрации Na^{22} в реках бассейна, приведены в табл. 1.

При расчетах использованы следующие значения N , τ_a и τ_e . Для географической широты 60° $N = 15,8 \cdot 10^{-5}$ ат/см²·сек (⁷), а $\tau_a = 13$ мес. (⁸). Параметр τ_e — среднее время задержки воды в бассейне реки (озера), — несомненно, зависит от особенностей бассейна, в частности его заболоченности, вклада снегового и подземного питания и т. п. Анализ гидрологического режима некоторых рек Европейской территории СССР показал, что

Таблица 1

Река, осадки	Озеро — источник реки	Средние многолетние гидрологические параметр		Расчетные средние многолетние величины		Результаты измерений ^а		Пункт отбора пробы	Дата отбора пробы
		M , л/км ² ·сек, (4,10)	$T_{\text{оз}}$, лет (4,9)	K	Na^{22} , 10^4 ат/л	Na^{22} , 10^4 ат/л	Na , мг/л		
Свирь	Онежское	9,9	15,0	0,246	2,5	$2,4 \pm 0,2$	1,9	Лодейное поле	21 X 1969 г.
Вуокса — Бурная	Сайма	9,6	4,0	0,615	6,4	$3,7 \pm 0,3$	3,9	п. Запорожское	16 VII 1969 г.
Волхов	Ильмень	7,4	0,2	0,970	13,2	$6,9 \pm 0,8$	10,0	Новая Ладога	2 VI 1969 г.
Дождь Невы	Ладожское	21,0 ^б	—	—	5,6	$7,8 \pm 1,0$	17,2	То же	9 IV 1970 г.
						$5,2 \pm 0,6$	4,4	» »	4 V 1970 г.
						$5,4 \pm 0,5$	0,2	Ленинград	29 IV 1969 г.
						$2,3 \pm 0,2$	4,5	Ленинград (водопровод)	23 II 1969 г.
						$2,3 \pm 0,2$	4,5	То же	21 III 1969 г.
		9,4	11,3	0,316	2,8 ^в ; 2,1 ^г	$2,4 \pm 0,2$	4,6	» »	3 IX 1969 г.
						$2,3 \pm 0,3$	4,5	» »	31 III 1970 г.
						$2,0 \pm 0,3$	4,6	» »	17 III 1970 г.
								р. Большая Невка	

^а Для Na^{22} указана средняя квадратичная ошибка. ^б Средняя многолетняя интенсивность атмосферных осадков для Ленинграда (¹¹). ^в Расчет по формуле (6) для теоретических значений n_1 , n_2 и n_3 . ^г Расчет по формуле (6) для экспериментальных значений n_1 , n_2 и n_3 .

наибольшая корреляция годового стока с годовыми осадками наблюдается при «сдвиге» осадков на 4—6 мес. (9), поэтому, не имея конкретных данных о времени задержки воды в бассейнах исследуемых рек, мы приняли для расчетов $\tau_6 = 6$ мес.

Концентрации Na^{22} в воде Свири (n_1), Вуоксы (n_2) и Волхова (n_3) рассчитывали непосредственно по формуле (5), а в воде Невы (n_H) — с учетом относительных вкладов каждого из этих притоков, атмосферных осадков и суммарного вклада малых рек и подземного питания в водный баланс Ладожского озера, а также испарения с его поверхности по следующей формуле:

$$n_H = \left[\frac{0,24n_1 + 0,23n_2 + 0,23n_3}{0,924} + 0,13 \frac{N e^{-\lambda \tau_a}}{M_H} + 0,17 \frac{N e^{-\lambda(\tau_a + \tau_6)}}{M_H} \right] K_L, \quad (6)$$

где K_L — «коэффициент старения» воды в Ладожском озере, M_H — модуль стока р. Невы. При этом расчет концентраций Na^{22} в воде Невы проводили для двух вариантов значений n_1 , n_2 и n_3 : 1) теоретических, вычисленных по формуле (5), и 2) непосредственно измеренных в течение 1969—1970 гг.

Результаты расчетов и измеренные концентрации в воде притоков Ладожского озера и в р. Неве приведены в табл. 1. Для измерения концентраций Na^{22} применяли следующую методику. Пробы воды объемом 200—600 л пропускали через ионнообменные колонки со смолой КУ-1 (сухой вес смолы 500 г). Поглощенные катионы элюировали 1N HCl. Элюат выпаривали и прокалывали при температуре не выше 500°. В полученном сухом остатке и в воде методом пламенной фотометрии измеряли содержание стабильного натрия и рассчитывали, какому объему исследуемой воды эквивалентен сухой остаток. Определение Na^{22} в сухом остатке проводили на двухкристальном сцинтиляционном γ -спектрометре совпадений по аннигиляционным γ -квантам, сопровождающим позитронный распад этого радионуклида. Размеры кристаллов NaJ(Tl) 70×70 мм. Эффективность регистрации распадов Na^{22} по пику полного поглощения аннигиляционных γ -квантов ($E = 0,51$ Мэв) равна 3,5% для навесок 12 г и 2,2% для навесок 45 г при фоне около 4 имп/час. В зависимости от активности измеряемых проб полное время набора импульсов составляло 1000—4000 мин.

Как видно из табл. 1, измеренные концентрации Na^{22} в водах Свири и Невы близки к расчетным величинам, однако для Вуоксы и Волхова они примерно в два раза меньше теоретических значений. При анализе причин наблюдаемых различий следует прежде всего учесть, что теоретические концентрации рассчитаны по средним многолетним параметрам, а результаты измерений пока немногочисленны и относятся к короткому периоду времени. Очевидно, что наиболее близкими к средним многолетним данным должны быть концентрации Na^{22} в озерах с медленным водообменом, т. е. в Онежском и Ладожском, а также в вытекающих из них реках.

Существенной причиной отличий теоретических значений от экспериментальных является известный произвол в выборе величины τ_6 без учета конкретных особенностей бассейна. Это хорошо видно на примере бассейна р. Вуоксы. Оз. Сайма фактически состоит из целой системы озер, в которую изливаются воды двух других сложных озерных систем — Саволакской и Карельской. Поэтому для более точной оценки концентраций Na^{22} в оз. Сайма и р. Вуоксе необходимо учитывать «старение» воды в каскаде озер, предшествующих оз. Сайма. Если для бассейна оз. Сайма выбрать $\tau_6 = 2,7$ лет, то расчетная концентрация совпадает с измеренной. По-видимому, и для сильно заболоченного бассейна оз. Ильмень величина τ_6 может быть значительно большей, чем принятая в данной работе. Следует учесть также, что в связи со слабым регулирующим влиянием оз. Ильмень происходят существенные сезонные колебания гидрологического режима р. Волхов, приводящие к сезонному ходу содержания Na^{22} в речной воде и не позволяющие по полученному небольшому ряду наблюдений оп-

ределить с достаточной точностью среднегодовую концентрацию этого радионуклида. Интересно отметить, что в период паводка (4 V 1970 г.), когда основное питание Волхова осуществляется талыми водами, а влияние испарения невелико, измеренная концентрация Na^{22} в речной воде близка к средней многолетней расчетной величине для атмосферных осадков.

Как известно, в результате ядерных взрывов 1961—1962 гг. в атмосферу было введено значительное количество Na^{22} искусственного происхождения⁽¹²⁾. Это привело к существенному увеличению содержания Na^{22} в атмосферных осадках в последующие годы, но уже в 1966 г. вклад искусственного Na^{22} уменьшился до уровня, пренебрежимого по сравнению с естественным⁽⁸⁾. Возможно, что в озерах с медленным водообменом, в частности в Онежском и Ладожском, еще сохранилось некоторое количество искусственного Na^{22} , однако, как показывают результаты данной работы, это количество, по-видимому, невелико и составляет незначительную долю от космогенного Na^{22} .

Институт эволюционной физиологии и биохимии
им. И. М. Сеченова
Академии наук СССР
Ленинград

Поступило
25 IX 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ О. А. Алексин, Л. В. Бражникова, Сток растворенных веществ с территории СССР, «Наука», 1964. ² Н. П. Морозов, Океанология, 8, в. 2, 216 (1968). ³ С. В. Калесник, Ладожское озеро, Л., 1968. ⁴ Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Тр. Лаб. озероведения Ленингр. ун-та, 20, Л., 1966. ⁵ И. В. Молчанов, Онежское озеро, Л., 1946. ⁶ Uusi Tietosanakirja, 17, Helsinki, 1964. ⁷ D. Lal, B. Peters, Cosmic Ray Produced Radioactivity on the Earth, Handbuch d. Physik, 46/2, 1967, p. 551. ⁸ W. Rödel, Zs. Naturforsch., 23a, 51 (1968). ⁹ А. А. Соколов, Гидрография СССР, Л., 1964. ¹⁰ Б. Д. Зайков, Средний сток и его распределение в году на территории СССР, Л., 1946. ¹¹ Атлас Ленинградской области, М., 1967. ¹² N. Bhandari, D. Lal, M. Rama, Tellus, 18, № 2—3, 391 (1966).