

ОСОБЕННОСТИ ВЫНОСА ГЛОБАЛЬНОГО ^{90}Sr С ВОДОСБОРОВ БОЛЬШИХ РЕК СУБАРКТИКИ В СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН

канд. биол. наук Н.А.БАКУНОВ, д-р геогр. наук Д.Ю.БОЛЬШИЯНОВ,
д-р геогр. наук Л.М.САВАТЮГИН

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@aari.nw.ru

Для больших рек европейской и азиатской частей Российского Севера выполнены оценки выноса из почвенного покрова водосборов радионуклида ^{90}Sr за период в 30 лет. С повышением суровости климата в направлении с запада на восток снижалось поступление ^{90}Sr с водосбора в гидрографическую сеть. Для Северной Двины, Печоры и Енисея, Лены вынос ^{90}Sr составил соответственно $\sim 0,6$ и $\sim 0,3$ % в год кумулятивного запаса на водосборе. Очищение водосборов рек от глобального ^{90}Sr (1965–1990 гг.) было низким, так как годовая величина выноса радионуклида с водосбора составляет $0,3$ – $0,6$ % кумулятивного запаса, что меньше доли физического распада ^{90}Sr .

Ключевые слова: ^{90}Sr , вынос, водоразделы рек Северная Двина, Печора, Енисей, Лена.

Длительное время Российская Субарктика не рассматривалась в качестве региона, ориентированного на использование атомных электрических станций (АЭС) для выработки электрической и тепловой энергии для нужд крупных городов и портов. Инвестиции государства в проекты строительства плавучих АЭС с планами их последующего размещения в районах Крайнего Севера потребует решения вопросов обеспечения радиационной безопасности этих объектов.

Современные воззрения на техногенные катастрофы и риски от них не исключают инцидентов на ядерных реакторах с инъекцией искусственных радионуклидов (ИРН) в атмосферу и перенос их на значительные расстояния [9, 11, 13]. Поэтому важно превентивно располагать оценками как краткосрочных, так и долгосрочных последствий загрязнения водоемов и их водосборных территорий долгоживущими ИРН.

Широко распространенные в природе химические элементы 2 группы таблицы Д.И.Менделеева (Ca, Sr) относятся к водным мигрантам, которым свойственна большая подвижность в ландшафтах гумидной, чем аридной областей. Эти элементы в природе не имели радиоактивных аналогов, но в процессе освоения человеком энергии ядер урана и плутония в биосферу Земли были введены разнообразные ИРН, в том числе и ^{90}Sr с полупериодом распада ~ 30 лет. Осознание опасности, исходящей от ^{90}Sr , являющегося химическим аналогом жизненно важного элемента Ca, потребовало длительных исследований поведения ^{90}Sr в окружающей среде, накопления в живых организмах и воздействия на них.

В биосфере земли радиоактивный Sr представлен ^{90}Sr бомбового и промышленного генезиса. В первом случае это ^{90}Sr , рассеянный по поверхности земли глобально, а во втором — это ^{90}Sr , выведенный за пределы технологических циклов в атомной промышленности в природную среду. Промышленный ^{90}Sr присут-

ствуется в почвенном покрове зон радиационных аварий (Великобритания, г. Уиндскейл, 1957 г.; Россия, г. Кыштым, 1957 г.; Украина, г. Чернобыль, 1986 г.), а также в составе воздушных выбросов от ядерных промышленных установок (АЭС) и утечек в водоемы-охладители АЭС.

При относительно высокой изученности поведения ^{90}Sr в гидросфере, по сравнению с другими ИРН, отдельные вопросы его водной миграции с водосборов северных рек исследованы недостаточно. Различия между регионами Российского Севера по климатическим, физико-географическим и ландшафтным условиям [6, 7, 8] предопределяли возможность неодинакового выноса глобального ^{90}Sr из почвенного покрова водосборных территорий в гидрографическую сеть.

Задача исследований состояла в установлении наиболее общих тенденций, закономерностей и особенностей в стоке ^{90}Sr с водосборов северных рек, расположенных в европейской и азиатской частях Российского Севера. Для решения поставленной задачи был привлечен глобальный ^{90}Sr , используемый в качестве метки почвенного покрова водосборов, с которых в течение нескольких десятилетий ^{90}Sr выносился в речную сеть.

Методика расчета стока глобального ^{90}Sr (1961–1990 гг.) с водами рек Европейского Севера ЕТС России, изложенная ранее [1], применена для расчета стока ^{90}Sr с водосборов рек Сибири.

Концентрация глобального ^{90}Sr в речной воде (C) и сток радионуклида с водами реки за год (R) находились из следующих выражений:

$$C = QP/V, \quad (1)$$

$$R = CV, \quad (2)$$

где Q – кумулятивный запас ^{90}Sr на водосборе реки; P – доля (%) ежегодного выноса ^{90}Sr от кумулятивного запаса на водосборе; V – сток реки.

Величина кумулятивного запаса (Q) ^{90}Sr на водосборе рек Европейского Севера на конкретные даты временного ряда (1961–1990 гг.) определялась [1] исходя из плотности отложения ^{90}Sr на почвенный покров (A) и площади (S) водосбора реки ($Q = AS$).

Значение плотности отложения ^{90}Sr на почвы водосбора после 1965 г. рассчитывалось по двухкомпонентной экспоненциальной модели

$$A_t = A_{\max} \{K_1 \exp(-0,693t/T_1) + K_2 \exp(-0,693t/T_2)\}, \quad (1)$$

где A_t и A_{\max} концентрации ^{90}Sr в почвенном покрове ($\text{Бк}/\text{м}^2$) в момент времени t и в 1965 г. соответственно; T_1 и T_2 полупериоды потерь ^{90}Sr из почвы (годы), обусловленные стоком ^{90}Sr «свежих» выпадений, еще не закрепившихся в почвенной среде, и с длительным сроком «старения» ^{90}Sr в почвах соответственно; K_1 и K_2 – вклады первой и второй компонент.

Распространение многолетнемерзлых пород (ММП) в районе водосборов рек Восточной Сибири, большая продолжительность ледостава и различие в распределении стоков по сезонам года не позволили априорно утверждать, что количественные показатели выноса ^{90}Sr с водосборов рек Европейского Севера будут пригодны для определения его стока с водами сибирских рек.

В расчетах стока ^{90}Sr с водами рек Европейского Севера ЕТС [1] принято, что вынос ^{90}Sr за 1961–1964 гг. составлял 2 % кумулятивного запаса на водосборе, а в последующие годы – 0,6 %. Эти вводные условия в рекогносцировочном расчете стока ^{90}Sr с водами Енисея были сохранены, за исключением показателя выноса за 1961 г., который был принят равным 0,6 % по следующей причине: масштабные ядерные испытания в атмосфере начались в конце сентября, к моменту начала ледостава на реках Сибири, поэтому атмосферные выпадения конца

1961 г. не могли повлиять на величину стока ^{90}Sr из-за экранирования русел рек льдом, а водосборов – снежным покровом. Определение ^{90}Sr в воде Енисея в четвертом квартале 1961 г. не показало увеличения его концентрации по сравнению с третьим кварталом [12].

Сопоставление рассчитываемых стоков ^{90}Sr из почвенного покрова водосборов Северной Двины с таковыми для рек Восточной Сибири встретило определенные затруднения из-за наличия у Оби и Енисея дополнительного загрязнения вод промышленным ^{90}Sr . Данные мониторинга вод Оби и Енисея [5, 14] представлены суммарным значением концентрации ^{90}Sr (глобального и промышленного). В такой ситуации расчет стока глобального ^{90}Sr для Енисея представлялся предпочтительным, так как на его водосборе в отличие от Оби (Кыштым, 1957 г.), не было масштабного аварийного загрязнения водосбора промышленным ^{90}Sr . На водосборе Енисея широко распространены многолетнемерзлые грунты, что сближает его (по этой характеристике) с другими реками Восточной Сибири. Вариабельность водного стока рек Енисея и Лены меньше, чем у Оби.

По расчету сток ^{90}Sr с водами Енисея за 1961–1990 гг. составил 720, а по опытным данным из [14] – 372 ТБк (см. табл. 1). По-видимому, реальный показатель выноса ^{90}Sr из почвенного покрова водосбора Енисея был примерно в два раза ниже того, с помощью которого удовлетворительно рассчитывался сток радионуклида с водосборов Северной Двины и Печоры (табл. 1).

В отличие от Енисея на водосборах Северной Двины и Печоры лишь в низовьях локально распространены (ММП) со средней температурой от +3 до –1 °С и мощностью мерзлых пород от 0 до 100 м [6]. Водосбор Енисея характеризуется зоной сплошного распространения ММП с температурой от –1 до –3 °С и мощностью мерзлых пород 50–100 м. Более суровые условия присущи водосборам Лены и ее притоков, где температура ММП на водосборе изменяется от –5 до –9 °С, а их мощность превышает 400 м. Из-за различий по температуре мерзлых пород, подстилающих почвенный покров водосборных территорий, глубина оттаивания в летний сезон верхнего слоя почвы на водосборах не будет одинаковой, как и продолжительность времени, в течение которого часть кумулятивного запаса ^{90}Sr почвы будет мигрировать в речную сеть. В почвах перенос ^{90}Sr происходит с потоками влаги при участии ионного обмена, а также в результате диффузии [2, 3, 10]. Эти транспортные механизмы участвуют в формировании выноса ^{90}Sr из поверхностных слоев почв водосборов в различные водоемы гидрографической сети. Процессы ионного обмена в системе почвенная влага– ^{90}Sr –почва, как и диффузия радионуклида в почве, зависят от температуры. В природных условиях увеличение температуры почвы на 10 °С сопровождается повышением коэффициента диффузии в 2–2,5 раза [10].

Снижение выноса ^{90}Sr с водосбора Енисея также связано с резким падением водного стока реки в зимний период, который у рек Европейского Севера выражен слабее. У многих притоков сибирских рек из-за промерзания русел до дна зимой сток прекращается.

Таблица 1

Динамика стока ^{90}Sr с водосборов рек, ТБк (1961–1990 гг.)
(числитель – расчетные, знаменатель – экспериментальные данные [14])

Река	Сток ^{90}Sr с водами рек						
	1961–1965	1966–1970	1971–1975	1976–1980	1981–1985	1986–1990	1961–1990
Сев. Двина	36,1/36	18,9/23	14,6/10,7	12,4/14,5	10,7/10,8	9,6/7,0	102,3/102
Печора	32,5/28	17,0/16,5	13,2/12	11,2/10	9,7/7,4	8,6/6,2	92,2/80,1
Енисей	126,9/122	66,1/69	51,7/86	43,3/27	37,7/29	33,4/39	359/372
Лена	119/100	64,6/67	49,9/39	42,3/32	36,9/37	32,7/17	345,3/292

При повторном расчете стока ^{90}Sr с водами Енисея величина P выноса радионуклида с водосбора принята равной 0,3 % в год на 1961 и 1965–1990 гг. и 1,0 % – на 1962–1964 гг. от запаса на водосборе. Сток, рассчитанный по этим условиям, оказался близким (360 ТБк) к найденному опытным путем (табл. 1). Стоки характеризовались сходной тенденцией изменения во времени. Поскольку в экспериментальной оценке стока (372 ТБк) присутствуют глобальный и промышленный ^{90}Sr , то долю промышленного можно определить по их разности. На промышленный ^{90}Sr пришлось ~3,5 % общего количества, поступившего в бассейн Северного Ледовитого океана. В такой ситуации результаты мониторинга концентраций ^{90}Sr в воде реки на значительном удалении от Красноярского горно-химического комбината должны быть близки к таковым глобального ^{90}Sr . По экспериментальным данным [14] концентрации ^{90}Sr в воде Енисея (п. Игарка) с 1978 по 1981 г. колебались от 9 до 14 Бк/м³, а по расчету на 1979 г. составили 13,3 Бк/м³. Согласованность в оценках концентраций ^{90}Sr , определенных расчетом и экспериментальным путем, является удовлетворительной.

Правомерность корректировки выноса ^{90}Sr с водосборов, занятых ММП, в сторону снижения P проверялась на примере водосбора р. Лены, не имеющего загрязнения промышленным ^{90}Sr . Расчетные значения стока ^{90}Sr для Лены (1961–1990 гг.) близки к установленным экспериментальным путем (табл. 1), но с тенденцией к более высоким значениям к концу временного ряда. Такая тенденция, видимо, связана как с истощением содержания глобального ^{90}Sr в поверхностных слоях почв водосборов, так и отсутствием свежих выпадений радионуклида из атмосферы. Совпадение расчетной и экспериментальной оценок стока ^{90}Sr для Лены позволило принять вынос глобального ^{90}Sr с водосборов Енисея и Лены (1965–1990 гг.) равным 0,3 % запаса на водосборе. Эта величина относится к выносу с водосборов рек, у которых почвенный покров подстилается толщей ММП и грунтов.

Водосбор Северной Двины находится на широте ~60–70°, а Лены – 54–70° с.ш. Несмотря на более южное расположение значительной части водосбора р. Лены (притоки Витим, Олекма) по сравнению с таковым Северной Двины вынос ^{90}Sr с водосбора Лены (0,3%) оставался низким. Пониженный вынос ^{90}Sr с водосбора Лены обусловлен повсеместным распространением мерзлоты и особенностью поверхностного стока. Из-за слабого оттаивания весной верхних слоев почв водосбора происходит быстрый сток талых вод, как и вод дождевых паводков. Промерзание русел малых и средних притоков Лены в зимний период дополнительно приводит к снижению выноса ^{90}Sr рекой.

Из-за более суровых климатических условий на водосборах Яны, Индигирки и Колымы правоммерно ожидать понижения выноса ^{90}Sr с водосборов, так как промерзание зимой русел у притоков рек наступает рано, вследствие чего Яна, Индигирка и Колыма имеют небольшой водный сток в зимний период. Правоммерно допустить, что температурный фактор в условиях Севера доминирует среди других по влиянию на перенос ^{90}Sr из почвенного покрова в речную сеть. По В.Н.Димо [8] в Полярном поясе сумма активных температур для почвы равна 130, а в двух областях Бореального пояса – 1290 и 1570. В полевых опытах было показано [3], что повышение температуры почвы на 10 °С приводит к 2–3-кратному увеличению коэффициента диффузии ^{90}Sr . Различия по сумме активных температур для почв рассматриваемых поясов достаточны, чтобы вызвать изменения в коэффициентах диффузии ^{90}Sr в почвах и повлиять на скорость обменных реакций в системе почвенный раствор, ^{90}Sr – почвенный поглощающий комплекс (ППК) почв.

Сток ^{90}Sr с водами Енисея (опытные значения) в отличие от Лены имел максимум, приходящийся на 1971–1975 гг. (см. табл. 1). Появление этого максимума, не свойственного стоку ^{90}Sr у других рек, по-видимому, связано с заполнением на Енисее водохранилищ (Братское, Красноярское), которое могло вызвать

дополнительное поступление ^{90}Sr из почвенно-растительного покрова затопляемых территорий в речную воду. Глобальным ^{90}Sr в 1971–1975 гг. были загрязнены не только верхние слои почв водосборов, но и ветви, хвоя, кора и стволы деревьев и кустарников, оказавшихся в зоне затопления.

К Лене по величине годового стока близка североамериканская река Маккензи (346,5 км³) с водосбором севернее 60° с.ш. На основе установленных значений выноса глобального ^{90}Sr (0,3–0,6 %) с водосборов больших рек Российского Севера можно допустить, что вынос радионуклида с водосбора р. Маккензи будет близким к этому диапазону величин.

С помощью глобального ^{90}Sr , использованного в качестве метки почвенного покрова водосборов, были выявлены различия в выносе радионуклида с речным стоком в бассейн Северного Ледовитого океана. Доля ^{90}Sr , выносимого с водосборов рек Восточной Сибири, была в ~2 раза ниже, чем у рек Европейского Севера ЕТС. В показателе выноса ^{90}Sr – 0,6 % (Северная Двина, Печора) и 0,3 % (Енисей, Лена) от запаса на водосборе интегрально отразился весь комплекс природных воздействий на миграционный перенос ^{90}Sr в системе почвы водосбора – сток в реки, что позволяет для рек проводить превентивные оценки возможных последствий загрязнения водосборов ^{90}Sr . Очищение водосборов рек от глобального ^{90}Sr (1965–1990 гг.) было низким, так как годовая величина выноса радионуклида составляет 0,3–0,6 % кумулятивного запаса, что меньше доли физического распада ^{90}Sr . Установленные размеры выноса ^{90}Sr с водосборов могут послужить ориентиром в оценках миграции отдельных поллютантов, поступающих на водосборы северных рек аэральным путем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакунов Н.А. Оценка выноса ^{90}Sr из почвенного покрова с речным стоком // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 2. С. 198.
2. Бакунов Н.А. Миграция ^{90}Sr в толще нарушенного сложения: идентификация механизма переноса // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1356.
3. Белова Е.И., Погудин Р.И., Коготков А.Я. Роль диффузии в перемещении ^{90}Sr по профилю почвы // Инф. бюл. Радиобиология. 1971. № 13. С. 51.
4. Бобовникова Ц.И., Махонько К.П. К вопросу о миграции ^{90}Sr в пресных водах суши // Радиоэкология водных организмов. Рига: Зинатне, 1973. Т. 2. С. 30.
5. Бочков Л.П., Вакуловский С.М. и др. О содержании цезия-137 в поверхностных водах суши // Метеорология и гидрология. 1983. №. 8. С. 79.
6. Водные ресурсы СССР и их использование. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 302 с.
7. Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 350 с.
8. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. М.: Колос, 1972. 360 с.
9. Израэль Ю.А., Вакуловский С.М. и др. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 295 с.
10. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. М.: Энергоиздат, 1981. 96 с.
11. Радиация. Дозы, эффекты, риск. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 80 с.
12. Середа Г.А., Бобовникова Ц.И. Радиоактивные изотопы в атмосфере и их применение в метеорологии. М.: Атомиздат, 1965. С. 361–372.
13. Baklanov A.A., Mahura A.G. et al. Statistical Analysis of Atmospheric Transport from the Nuclear Risk Sites in the Arctic Region. The 5th Intern. Conf. on Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic. St.Petersburg. Russia, 2002. P. 119.
14. Chumichev V.B. Sr-90 discharge with main rivers of Russia into the Arctic Ocean during 1961–1990. Scientific Committee of the Environmental Radioactivity in Arctic and Antarctic, Norwegian Radiation Protection Authority. Osteras, Norway, 1995. P. 79–83.

N.A.BAKUNOV, D.YU.BOLSHIYANOV, L.M.SAVATYUGIN

**PECULIARITIES OF GLOBAL ⁹⁰Sr RUNOFF FROM WATERSHEADS
OF SUBARCTIC BIG RIVERS TO THE ARCTIC OCEAN**

Estimations of ⁹⁰Sr runoff from soils of the Russian North watersheds during the period of 1961–1990 have been made. ⁹⁰Sr supply to rivers lowered from the west to the east with increasing of climate severity. ⁹⁰Sr supply to Severnaya Dvina River and to Pechora River was 0,6% of reserves during one year and 0,3% in a year for Yenisey River and Lena River.

Key words: ⁹⁰Sr, runoff, watersheds of Severnaya Dvina River, Pechora River, Yenisey River, Lena River