

льдины, на которой располагался ледовый лагерь. Это позволило составить и в дальнейшем корректировать карту льдины. Кроме того, на вертолете была установлена инфракрасная камера, что позволяло оценивать температуру поверхности, а также измеритель альбедо, что позволяло оценивать рельеф поверхности льда. Практически все карты и схемы дрейфующей станции составлены с помощью данных, полученных с вертолета.

Сеть буев для наблюдения за распределением и дрейфом льда

Вокруг дрейфующей станции, а также на удаленно расположенных наблюдательных станциях была установлена сеть специальных SIMBA буев и DTC-буев для отслеживания вертикального распределения температуры и толщины льда в местах установки.

На заключительном этапе экспедиции вокруг основной льдины была развернута небольшая распределенная сеть (DN) буев-дрифтеров — всего 22. Эта сеть использовалась для отслеживания дрейфа льдины и ее окружения и позволяла рассчитывать деформацию морского льда в различных пространственных масштабах.

Экспедиция MOSAiC внесла значительный вклад в изучение Арктики, который еще предстоит оценить. Было собрано огромное количество научных данных,

в работах приняло участие большое количество людей из разных стран. Создана база данных, в которую занесены полученные результаты наблюдений. Анализ данных и обсуждение результатов займет длительное время. Раз в две недели проходят видеоконференции, на которых заинтересованные специалисты обсуждают возникающие вопросы, планируют дальнейшую совместную работу. 28 апреля в рамках Недели Германии в Санкт-Петербурге состоялась конференция «Арктическая экспедиция MOSAiC — измеряя исчезающий мир». На этой конференции российские и немецкие участники экспедиции рассказали про ее цели и ожидаемые результаты, поделились своими впечатлениями от экспедиции. Осенью 2021 года в городе Потсдам (Германия) планируется большая международная научная конференция, посвященная обсуждению результатов, полученных в экспедиции. Российские участники планируют выступить на ней с рядом докладов.

От участия в данной экспедиции и приобретенного опыта у авторов осталась масса приятных впечатлений. Хочется надеяться, что в будущем еще будут полярные экспедиции подобного рода с привлечением специалистов из разных стран и сотрудники ААНИИ также будут принимать в них активное участие.

Н.В. Колабутин, Е.В. Шиманчук (ААНИИ)

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ААНИИ НА СЕВЕРЕ РОССИИ

После масштабного загрязнения земной поверхности в 1961–1964 годах продуктами испытаний ядерных боеприпасов в атмосфере прошло более 56 лет, а после выпадений «чернобыльских» радионуклидов от аварийного блока ЧАЭС — 36 лет. Эти выпадения сформировали основной техногенный фон искусственных радионуклидов (ИРН) в наземной и водной экосистемах Земли, в частности в северных регионах России (Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»). М.: ИздАт, 2005; AMAP Assessment 2009: Radioactivity in the Arctic. Oslo, 2010). В настоящее время радиологическая ситуация там является благополучной: продукты питания, получаемые коренным населением охотой на морского зверя, ловлей рыбы и разведением северного оленя, содержат искусственные радионуклиды в концентрациях, которые многократно ниже (Рамзаев П.В., Троицкая М.Н., Дударев А.А. и др. Гигиеническая оценка радиационной обстановки в районах проживания коренных народов Крайнего Севера // Радиационная гигиена: Сб. СПб., 2003. С. 131–139) допускаемых санитарно-гигиеническим регламентом СанПин 2.3.21078-01.

Радиоэкологические исследования последних десятилетий на Севере ориентированы на задачи прикладного характера. В них значительное внимание уделяется вопросам обеспечения радиационной безопасности объектов с радиоактивными отходами (РАО), захороненных на дне Карского моря и заливов архипелага Новая Земля (Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. О загрязнении арктических морей радиоактивными отходами западноевропейских радиотехнических заводов //

Атомная энергия. 1984. Т. 57. Вып. 3. С. 186–188; AMAP Assessment 2009: Radioactivity in the Arctic. Oslo, 2010).

Мониторинг этих районов проводился в рамках международных научно-исследовательских рейсов (1991–1994) на судах России (AMAP Assessment 2009: Radioactivity in the Arctic. Oslo, 2010). Были получены объективные данные по современному состоянию загрязнения ИРН вод северных морей России, позволившие оценить роль отдельных источников ИРН. Итогом этих исследований стало признание ведущей роли глобальных выпадений ИРН из атмосферы в радиоактивном загрязнении северных морей России и приносящих течениями в северные моря отходов атомной промышленности западноевропейских стран (AMAP Assessment 2009: Radioactivity in the Arctic. Oslo, 2010). Исследования, выполненные в Карском море вблизи захороненных объектов, содержащих РАО (Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»). М.: ИздАт, 2005; AMAP Assessment 2009: Radioactivity in the Arctic. Oslo, 2010), показали, что особой опасности эти объекты для морской среды еще не представляют. Некоторые из захороненных объектов были рассчитаны на устойчивость к утечке во внешнюю среду на срок ≈ 500 лет (Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»). М.: ИздАт, 2005).

Для радионуклидов ^{90}Sr (стронций), ^{137}Cs (цезий) с полупериодом распада $T = 30$ лет такого времени до-



Отбор проб воды и донных отложений из Ладожского озера (слева), реки Невы (в центре), реки Волхов (справа)

статочно для распада в захороненном объекте. Иная ситуация в будущем ожидает объекты, содержащие $^{239,240}\text{Pu}$ (плутоний) и другие трансурановые радионуклиды с полупериодами распада тысячи лет. Есть надежда на успехи науки в совершенствовании методов и технологий консервации и утилизации трансурановых радионуклидов. Они позволят решать вопросы обращения с такими отходами атомной промышленности и судов с ядерными реакторами. Результаты регулярного мониторинга вод и донных отложений возле захороненных объектов с РАО в Карском море могут (при необходимости) послужить основанием к подъему захороненного объекта со дна моря или принятию мер купирования выхода ИРН в морскую среду.

Второе направление в радиозокологических исследованиях, которое развивается в ААНИИ, ориентировано на выявление и изучение закономерностей миграции ИРН в системе водосбор — водоем — сток. Без таких знаний невозможно в случаях аварийных ситуаций с ИРН решать вопросы прогнозирования радиоактивного загрязнения и организации мер защиты населения, использующего в питании воду и рыбу из местных водоемов.

Радионуклиды из состава глобальных выпадений ^{90}Sr , ^{137}Cs привлекались нами к определениям количественных показателей перехода этих ИРН с водосбора в речную сеть и скорости очищения речных и озерных вод от этих ИРН с течением времени. Для интервала 1964–1990 годов нами было показано, что ежегодно с водосборов больших и средних рек Российского Севера ^{90}Sr выносилось 0,3–0,5 % от запаса на водосборе. Большим выносом ^{90}Sr с водосбора характеризовались реки Европейского Севера, чем реки Восточной Сибири (Бакунов Н.А., Большианов Д.Ю., Макаров А.С. Естественная дезактивация вод больших рек российского Севера от глобального ^{90}Sr // Радиохимия. 2012. № 2. С. 188–192). Устойчивый во времени вынос ^{90}Sr показывали реки, вытекающие из больших и глубоких озер. Поступление ^{137}Cs с водосбора в речную сеть, в отличие от ^{90}Sr , составило сотые доли процента от запаса на водосборе. Наибольший вынос ^{137}Cs в речную сеть наблюдался на северо-западе страны, где реки берут начало из озер или протекают через них в своем среднем и нижнем течении. Загрязнение вод ^{90}Sr и ^{137}Cs сопровождалось накоплением этих ИРН в донных отложениях и биоте водоемов. К настоящему времени установлено, что в основном количество ^{90}Sr и ^{137}Cs в загрязненном водоеме распределяется между донными отложениями и водной массой бессточных или слабопроточных водоемов. В живых организмах водоемов содержалось

не более 1–3 % от общего содержания радионуклида в водоеме.

Полувековой период пребывания ИРН на водосборах рек (1964–2020) и в экосистемах водоемов не прошел бесследно: концентрации ^{90}Sr в поверхностных водах по сравнению с 1964–1965 годами уменьшились с 50–70 до 4–8 мБк/л. За аналогичный период концентрации ^{137}Cs в воде снизились с 40–50 до 1–2 мБк/л. По геохимической природе ^{137}Cs не является водным мигрантом, поэтому очищение речных и озерных вод от ^{137}Cs протекало быстрее, чем от ^{90}Sr . С 1964 по 1990 год снижение концентраций ^{90}Sr в воде рек Российского Севера подчинялось экспоненциальной зависимости. Реки Северная Двина, Онега, Печора и Мезень очищались от ^{90}Sr с полупериодом потерь T , равным 12–15,5 лет. Полупериод потерь является отрезком времени, за которое содержание радионуклида в воде снижается в два раза. Наши определения показателя T ^{90}Sr (для рек Европейского Севера) оказались близки к найденным финскими радиоэкологами (10,5–12,8 лет) для рек севера и юга Финляндии (Рахола Т., Саксен К., Костийнен Э., Пухакайнен М. Техногенная радиоактивность в организме человека и окружающей среде // Радиохимия. 2006. Т. 48. № 6. С. 562–566). Несколько меньшее значение показателя обусловлено небольшим водным стоком финских рек (меньше 12 км³/год) и направленностью стока с севера на юг страны. В природных условиях Восточной Сибири очищение речных вод от ^{90}Sr (в интервале с 1964 по 1990 год) протекало быстрее, чем на северо-западе европейской части России. Воды рек Лены и Индигирки очищались от ^{90}Sr с T , равным 10 и 7,5 лет соответственно. В условиях более сурового климата, наличия вечномерзлых пород на водосборах и при другом типе питания рек воды Индигирки очищались от ^{90}Sr быстрее Северной Двины (рис. 1). Водосбор р. Лены находится в области широкого распространения вечной мерзлоты. У р. Лены многие притоки в зимнюю межень не имеют стока. Лена питается в это время водами глубоких сильно минерализованных (до 500 мг/л) водоносных горизонтов, где нет ^{90}Sr . Дренаживание зимой этими водами донных отложений Лены способствует их очищению от ^{90}Sr .

Мониторинг глобального ^{137}Cs в водах российских рек отсутствовал. Поэтому их очищение от ^{137}Cs оценивается приближенно. В целом считается, что в речных водах глобального ^{90}Sr в 10 раз больше, чем ^{137}Cs . Наши оценки очищения вод относятся к озерно-речным системам Кольского полуострова и Карельского перешейка. Результаты наблюдений показывают более узкое (4:1) отношение концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs в поверхностных

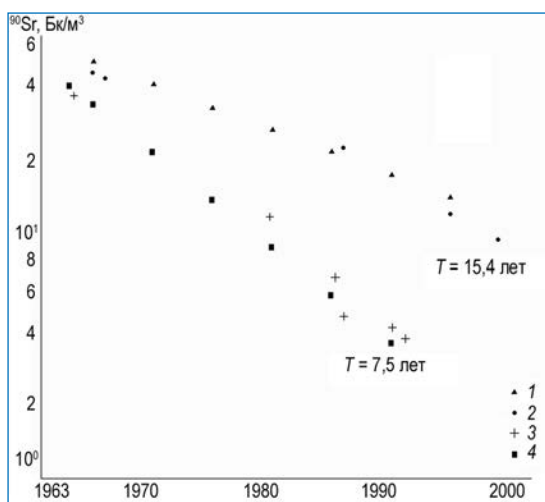


Рис. 1. Динамика уровней ^{90}Sr в воде Северной Двины (верхняя кривая) и Индигирки (нижняя кривая). 1, 3 – расчет, 2, 4 – наблюдения

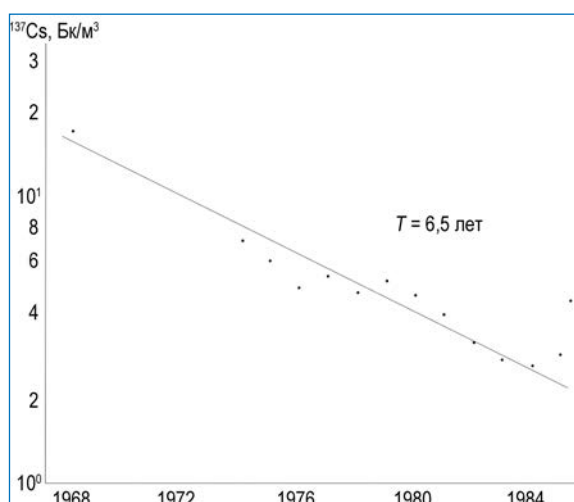


Рис. 2. Динамика уровней ^{137}Cs в воде озер и рек Восточной Финноскандии (1968–1985). T – полупериод очищения озерно-речных систем

водах этого региона. В интервале с 1968 по 1985 год (рис. 2) воды озер этого региона очищались от ^{137}Cs с $T = 6,5$ лет (Большиянов Д.Ю., Бакунов Н.А., Макаров А.С. К вопросу миграции ^{137}Cs в водных системах Восточной Финноскандии // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 3. С. 329–335).

В глубоководном Онежском озере от ^{137}Cs и ^{90}Sr воды очищались с $T = 8$ и 16 лет соответственно. Результаты исследований миграции ИРН в глубоких озерах, имеющих сток (Ладожское, Онежское — Россия, Пяйянне — Финляндия), показали, что воды озер очищаются от ^{90}Sr и ^{137}Cs в 2–4 раза медленнее смены озерных вод в водоеме. Смена загрязненных ^{90}Sr и ^{137}Cs озерных вод на менее «грязные» речные способствовала замедлению процесса естественной дезактивации вод. Основным фактором, сдерживающим очищение вод, является кумулятивный запас ^{90}Sr и ^{137}Cs в грунтах дна. Он же выступает в качестве регулятора их концентраций при смене гидрологического режима водоемов (паводок — межень). Обмен ионов ^{90}Sr и ^{137}Cs в системе поровые растворы грунтов дна — вода способствует поддержанию загрязнения радионуклидами вод озер и русла рек.

Выполненные радиоэкологические исследования позволяют в случаях несанкционированных поступлений ^{90}Sr и ^{137}Cs в водоемы воздушным путем прогнозировать загрязнение их вод и очищение с течением времени. Этим целям служат количественные показатели выноса ИРН с водосборов и очищения вод. Применительно к загрязнению ^{90}Sr и ^{137}Cs вод северных водоемов была предложена градационная шкала оценки загрязнения пресноводной рыбы по показателю коэффициента накопления радионуклида, имеющего тесную связь с химическим содержанием в воде элементов кальция и калия (Бакунов Н.А., Саватюгин Л.М. К вопросу устойчивости пресноводных водоемов Восточной Финноскандии к отложению ^{137}Cs : радиологический аспект // Арктика, экология и экономика. 2013. № 1 (9). С. 24–35). Назначение шкалы — использование в системе поддержки управленческих и организационных решений на минимизацию ущерба природе в ситуациях с загрязнением водоемов ^{90}Sr и ^{137}Cs .

Н.А. Бакунов, Д.Ю. Большиянов,
А.С. Макаров (ААНИИ).
Фото Д.Ю. Большиянова

БИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА НЭС «АКАДЕМИК ФЕДОРОВ» (48-Я РАЗ)

К настоящему времени накоплен объемный материал экспериментальных данных о воздействии космогеофизических факторов на состояние биосферы. В числе этих данных есть необъяснимые эффекты гравитационных воздействий, проявляющихся в биосенсорах. Изучение их пространственно-временных характеристик биофизическими методами имеет фундаментальное значение для исследования влияния космофизических факторов на функции центральной нервной системы человека и временную структуру организма, основанную на биоритмах клеток, субклеточных структур, тканей и органов.

Экспрессный метод определения скорости сбраживания глюкозы в жидкой питательной среде используется во многих микробиологических, генетических и экспериментальных исследованиях. Интервалом вре-

мени приспособления микробных клеток к условиям внешних факторов, с которыми они сталкиваются при посеве в новую питательную среду, является лаг-фаза (L). При обычных условиях культивирования продолжительность лаг-фазы, например, культуры бактерий (штамма) *Escherichia coli* M-17 составляет 180–210 мин. В этот период бактерии начинают ассимиляцию и остро реагируют на изменения в окружающей среде. Штамм *E. coli* M-17 активно участвует в переваривании пищи, выработке ряда аминокислот и витаминов, в том числе K2 — активного участника обменных процессов, ответственного за синтез протромбина крови и регуляцию состава микрофлоры кишечника.

В период 48-й Российской антарктической экспедиции на НЭС «Академик Федоров», следовавшем из Санкт-Петербурга в Антарктику, проводились наблю-