

Деятельность Международной лаборатории радиоактивности моря

А. Уолтон*

Проблемы рационального использования и сохранения таких ценных природных ресурсов, какими являются моря и океаны, находятся в центре международного внимания лишь в течение последних трех десятилетий. Однако, несмотря на растущее признание важности этих проблем, международное соглашение о контроле за сбросами отходов (включая ядерные отходы) в моря и океаны появилось лишь в последнем десятилетии.

Международная лаборатория радиоактивности моря была основана в 1961 году, задолго до вступления в силу международного соглашения. В действительности, лаборатория возникла в результате того, что Международное агентство по атомной энергии предвидело и оценило необходимость исследования проблемы поведения радиоактивных веществ в морях и океанах — проблемы, о которой было мало известно до начала 50-х годов. В сотрудничестве с правительством Монако и Океанографическим институтом лаборатория была создана в 1961 году в Океанографическом музее Монако. Символично, что лаборатория была размещена в здании, построенном по приказу одного из наиболее выдающихся пионеров океанографии — принца Альберта Первого Монакского.

С 1961 года программа и деятельность Монакской лаборатории расширились и изменились в силу смещений центров внимания в изучении проблем загрязнения морей и океанов. Однако, несмотря на многочисленные изменения основных направлений деятельности, которые имели место в течение последних 20 лет, по-видимому, справедливости ради следует отметить, что широкие цели остались неизменными. Поэтому цели лаборатории состоят в том, чтобы:

- выполнять исследования по выявлению радиоактивных веществ и других форм загрязнений в морской среде и изучению их поведения;
- обеспечивать качество и сопоставимость осуществляемых национальными лабораториями исследований радиоактивных веществ и других форм загрязнений в морской среде путем межлабораторных сравнений, калибровки и стандартизации методик;
- оказывать государствам-членам помощь в изучении проблем радиоактивности моря и защиты окружающей среды путем подготовки научных кадров, организации программ координированных исследований и предоставления консультаций и помощи.

* Директор Международной лаборатории радиоактивности моря, Монако.

Следует отметить, что лаборатория занимается не только вопросами, связанными с радиоактивностью. Принято решение, что в сотрудничестве с ЮНЕП (Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде) и ЮНЕСКО, а также при их поддержке лаборатория, в дополнение к своей обычной программе по изучению радиоактивности, будет проводить исследования "неядерных загрязнителей". Такое дополнение программы представляется логичным и разумным ввиду схожести полевых и лабораторных исследований по этим темам.

Для выполнения работ по указанным темам персонал лаборатории, в соответствии с направлением деятельности, организационно сгруппирован в три основные секции: химия морской среды, биология морской среды и морская седиментология/геохимия, причем последняя секция была образована на базе реорганизованной секции исследований окружающей среды в конце 1980 года.

Химия морской среды

Трансурановые элементы в морской среде: одной из основных программ секции химии морской среды является программа исследования поведения трансурановых элементов в морской среде. Недавно были проведены измерения содержания плутония-238, плутония-239, плутония-240 и америция-241 в морской и речной воде, взвешенном веществе, дождевой воде и отложениях, собранных в различных районах акватории Средиземного моря. Эти данные позволили проследить поведение трансурановых элементов с момента их поступления в море с речным стоком и атмосферными осадками до их попадания, там, где оно происходит, в бентосный пограничный слой в результате процессов седиментации. Исследования неожиданно показали, что плутоний, попадающий в воды Средиземного моря из осадков, сравнительно легко растворяется, в то время как америций имеет тенденцию более легко связываться с частицами вещества, в результате чего америций переносится в вертикальном направлении осаждающимися частицами быстрее, чем плутоний. Исследования механизма такого фракционирования плутония и америция в верхних слоях вод Средиземного моря продолжаются. Получение более точных данных о скорости и объеме переноса трансурановых элементов в донные отложения, безусловно, представляет важное значение для оценки последствий захоронения радиоактивных отходов в море.

Микроэлементы в Средиземном море: в ходе выполнения работ в рамках ЮНЕП по программе геохимии



Океанографический музей в Монако, в котором размещается Международная лаборатория радиоактивности моря Агентства.

микроколичеств металлов в Средиземном море лаборатория изучила распределение некоторых микроэлементов с целью получения исходных данных, по которым можно будет определить существование долговременных тенденций. Во время нескольких последних плаваний в различных районах открытых вод Средиземного моря были собраны образцы морской воды и донных отложений. Для сравнения было взято также ограниченное число образцов на прибрежных участках. Содержание меди, цинка, кадмия и ртути в образцах морской воды определяли методом анодной полярографии с накоплением, в образцах отложений — методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Несмотря на существование так называемых "горячих точек" в распределении микроколичеств этих металлов в прибрежных районах Средиземного моря, оказалось, что уровни их содержания в открытых водах Средиземного моря не очень сильно отличаются от соответствующих уровней в других океанических районах, и обычно они ниже уровней, которые, как сообщается, отмечаются в акваториях других закрытых морей, таких, как Северное море, Ирландское море и Балтийское море.

Программа взаимной калибровки: в силу своего уникального международного характера лаборатория стала признанным научным учреждением, осуществляющим координацию работ в рамках ряда глобальных программ, направленных на улучшение качества данных об окружающей среде путем проведения межлабораторных сравнений, а также подготовки и распространения эталонных материалов.

При участии приблизительно ста лабораторий более чем тридцати стран мира в целях разработки методики измерений радионуклидов были произведены контрольные взаимные калибровки с использованием трех образцов морской воды, трех образцов отложений и четырех морских биологических образцов. Организациям, принимавшим участие в

этой работе, были направлены гомогенные, подготовленные в лаборатории образцы. После критического анализа результаты исследования показали, что, несмотря на то, что сравнимость измерений продуктов деления в последние годы значительно улучшилась, возможно, благодаря усовершенствованию гамма-спектрометрической аппаратуры, сравнимость измерений низкоактивных трансурановых элементов остается неудовлетворительной. Поэтому в течение последних нескольких лет работы по взаимной калибровке были в большей мере направлены на измерение трансурановых элементов. Выяснилось, что, для того чтобы можно было проверять эффективность применяемых методов на эталонных материалах, необходимо обеспечить возможность получения эталонных материалов, для которых точно известны концентрации радионуклидов, представляющих интерес для исследований. В настоящее время в целях удовлетворения такой потребности проводятся работы по подготовке большого количества гомогенных образцов донных отложений.

Методы контрольных взаимных калибровок были также применены для калибровки измерений микроэлементов и хлорзамещенных углеводородов. До настоящего времени около 120 лабораторий 35 стран мира приняли участие в программе по микроэлементам. В течение 1976-1980 годов были завершены контрольные взаимные калибровки на четырех биологических образцах (устрицы, копеподы, морские растения и мышечные ткани рыб). Результаты показали, что сравнимость аналитических данных в целом значительно лучше ожидавшейся, за исключением данных анализа свинца.

В работе по контрольным взаимным калибровкам измерения содержания хлорзамещенных углеводородов в морской воде, морских организмах и донных отложениях к настоящему времени приняли участие около 50 лабораторий различных стран мира. Анализ результатов показывает, что, хотя разброс получаемых значений для хлорзамещенных углеводородов в целом превышает разброс для тяжелых металлов вследствие присущей измерениям хлорзамещенных углеводородов более низкой воспроизводимости результатов, сравнимость данных, полученных различными лабораториями, оказалась лучше ожидавшейся, за исключением данных анализа некоторых соединений, таких, как альфа-гексахлорбензол, гамма-гексахлорбензол и пр. Учитывая то обстоятельство, что некоторые принимавшие участие в исследованиях лаборатории лишь недавно приступили к выполнению программ экологических измерений, в будущем ожидается значительное улучшение сравнимости результатов. Как и программа взаимной калибровки измерений микроэлементов, работы по контрольной взаимной калибровке измерений хлорзамещенных углеводородов также представляют собой важный раздел проектов, выполняемых при поддержке ЮНЕП.

В дальнейшем работы по взаимной калибровке будут включать в себя анализ природных радиоактивных веществ и радионуклидов, высвобождающихся в результате работы промышленных предприятий, а также аналитические исследования

загрязнителей неядерного происхождения. Больше внимания будет также уделяться вопросам стандартизации методов отбора проб.

Для того чтобы Монакская лаборатория играла ведущую роль в этой важной международной работе, она должна поддерживать свою научно-техническую компетенцию в данной области на самом высоком уровне. Весьма ценным является даже административный и организационный опыт, накопленный за прошедшие годы в области распространения образцов и последующей обработки результатов, полученных различными лабораториями многих стран мира.

Биология морской среды

Работа секции биологии также охватывает исследования как радиоактивных, так и нерадиоактивных веществ. Многие радиоиндикаторные методы, первоначально разработанные для работ, связанных с радиоактивными веществами, оказались весьма полезными для исследований тяжелых металлов.

Вертикальный перенос загрязнителей: основная цель этого проекта состоит в количественной оценке направленного вниз вертикального потока таких загрязнителей, как радионуклиды, тяжелые металлы, хлорзамещенные углеводороды и пр., возникающего в результате погружения биогенных частиц. Вертикальный поток загрязнителей, содержащихся в биогенных остатках, таких, как фекалии, остатки линьки, тушки и т.д., определяется путем анализа веществ, попадающих в ловушки для отложений, расположенные в море на различных глубинах.

Одновременно со сбором в ловушки аналогичные вещества, только что выделенные зоопланктоном и другими морскими организмами, специальными методами собираются с борта судна; затем производится анализ этих веществ на содержание аналогичных загрязнителей. Данные об уровнях содержания загрязнителей в биогенных остатках на различных глубинах в сочетании с аналогичными данными для таких же веществ, поступающих в поверхностные воды ("исходные данные"), позволят делать оценки в отношении выделения и (или) поглощения этих загрязнителей биогенными остатками по мере их погружения. Лабораторные измерения распада и последующего выделения загрязнителей в этих веществах с использованием как радиоиндикаторного анализа, так и анализа стабильных элементов, дополняют полевые исследования. Полученная информация используется для проверки моделей движения поступающих в поверхностные слои загрязнителей вниз по направлению к бентосному пограничному слою. Результаты исследований показывают, что погружающиеся биогенные частицы часто содержат чрезвычайно высокие уровни различных загрязнителей и способствуют удалению из поверхностных слоев и переносу на глубину многих из указанных загрязнителей.

Использование этой работы для исследования потоков трансурановых элементов составит часть программы VERTEX (Vertical Transport and Exchange of Materials in Upper Waters of the Oceans — вертикальный перенос и обмен веществ в



Один из ученых лаборатории готовится произвести препарирование биологического образца для исследования радиоактивности.

поверхностных водах океанов), предложенной несколькими научными учреждениями, входящими в Национальную организацию содействия развитию науки США, в рамках Международного десятилетия исследований мирового океана (1980-1990 годы).

Бионакопление трансурановых элементов и их перенос по пищевым цепочкам: в настоящее время проводятся эксперименты с применением радиоиндикаторов для измерения коэффициентов переноса плутония, америция, кюрия и нептуния из воды, отложений и пищи в разнообразные морские организмы. Особое внимание уделяется изучению пелагических видов, таких, как зоопланктон, которые способствуют развитию процессов вертикального переноса, и бентосных видов, которые обитают в условиях тесного контакта с донными отложениями. Данные исследований бентосных организмов должны служить в качестве исходных параметров при оценках воздействия глубоководных захоронений. Кроме того, на уровне органов и субклеточном уровне проводятся исследования миграции и поведения трансурановых элементов, прошедших через имитированные пищевые цепочки. Полученные в настоящее время результаты показывают, что в процессах переноса трансурановых элементов в морские организмы вода и пища играют более важную роль, чем донные отложения. Кроме того, некоторые бентосные беспозвоночные удерживают значительную долю этих поступающих с водой или пищей радионуклидов в течение продолжительного времени. Проведению экспериментальных исследований в значительной степени способствовало использование гамма-излучателя на плутонии-237, позволяющего производить измерения *in vivo*.

Распределение природных альфа-излучателей в морских организмах: образующийся в результате естественного распада радиоизотоп полоний-210 весьма эффективно концентрируется в морских



Сбор образцов в море.

организмах и может явиться причиной получения многими видами очень высоких доз излучения.

Уровни содержания полония-210 в теле рыб могут достигать 7000 пКи/кг (живого веса); в то же время в отношении концентрата рыбного белка сообщалось, что в одном случае было зарегистрировано исключительно высокое значение содержания, составляющее 26 000 пКи/кг сухого веса концентрата анчоуса. Доза излучения, получаемая зоопланктоном от содержащегося в нем полония-210, оценивается на уровне, приблизительно равном 400 мбэр/год, в то время как для некоторых видов доза, получаемая критическими органами, может составлять около 10 мбэр/год. Коэффициенты накопления полония-210 могут превышать коэффициенты накопления некоторых трансураниевых изотопов от 10 до 10 000 раз и более.

В настоящее время осуществляется программа исследований распределения полония-210 в тканях отдельных морских организмов. Результаты показывают, что гепатопанкреас или печень многих видов животных обычно характеризуется самым высоким уровнем содержания полония-210, поэтому выявлению мест связывания полония-210 внутри этого органа уделяется особое внимание. В будущем будет предпринята попытка выяснить с помощью биохимических методов механизмы распределения этого радионуклида на субклеточном уровне. Данные будут использованы при определении естественных фоновых мощностей доз и при оценках доз, получаемых от других радионуклидов, поступающих в окружающую среду. Эта работа может внести важный вклад в понимание противоречивой проблемы воздействия низких уровней ядерного излучения на живые организмы.

Биокинетические исследования тяжелых металлов: эти исследования представляют собой яркие примеры того, как использование методов радиоактивных индикаторов получило дальнейшее

развитие и было перенесено на исследования миграции и поведения содержащих тяжелые металлы загрязнителей в морской биосфере. С помощью гамма-активных индикаторов: кадмий-109, ртуть-203, селен-75, мышьяк-74 и ванадий-48 можно проводить исследования *in vivo* процессов, накопления и выведения этих металлов, происходящих в морских организмах, не прибегая к характерным для анализа стабильных металлов этапам умерщвления организмов, экстракции и химического анализа веществ. Таким методом бионакопление и перенос по пищевым цепочкам исследуются как в пелагических, так и в бентосных видах. Особое внимание было уделено оценке степени, в которой такие параметры окружающей среды, как температура, соленость и содержание металлов влияют на биогеохимические циклы этих элементов. Было также проведено взаимное сравнение результатов лабораторных экспериментов с аналогичными измерениями, проведенными *in situ* с целью оценки степени, в которой результаты, полученные в лаборатории, отражают процессы, реально происходящие в природной окружающей среде. Сравнение показывает, что определенные факторы окружающей среды оказывают сильное влияние на поток металлов через многие морские виды, и, следовательно, биогеохимические циклы этих металлов изменяются в зависимости от этих факторов. Эксперименты по взаимному сравнению результатов лабораторных и полевых исследований выявили многочисленные трудности, возникающие при подготовке и проведении лабораторных экспериментов, которые обеспечивали бы получение надежной информации о происходящих в природе процессах.

Базисные исследования металлических микроэлементов в организмах, обитающих в открытых водах Средиземного моря: за последнее время было предпринято несколько океанографических плаваний с целью сбора и исследования различ-

ных пелагических организмов и определения содержания в них отдельных металлических микроэлементов. Особое внимание было уделено выделению и анализу индивидуальных видов с тем, чтобы устранить многие проблемы, возникающие при интерпретации уровней содержания металлов в образцах смешанного планктона. Результаты показывают, что уровни содержания металлических микроэлементов в пелагических видах открытых вод Средиземного моря в целом не отличаются от уровней, обнаруженных в аналогичных организмах, обитающих в других районах Мирового океана. Во многих видах, населяющих открытые воды Средиземного моря, обнаруживается весьма низкая концентрация ртути.

Биокинетические исследования хлорзамещенных углеводов: запланировано проведение экспериментов по исследованию бионакопления и распределения отдельных соединений хлорзамещенных углеводов в тканях разнообразных морских видов, а также процессов очищения от этих соединений. Кроме того, исследуется степень их переноса по пищевым цепочкам, а также поступления из донных отложений. Особое внимание уделяется определению возможной степени экстраполяции полученных в лабораторных условиях данных о биокинетике хлорзамещенных углеводов на реальные ситуации природной окружающей среды. Информация, накопленная в результате этих сравнений между природными условиями и лабораторными системами, послужит в качестве исходных данных для лабораторных экспериментов, имеющих целью получить реалистическую информацию о процессах *in situ*.

Морская седиментология

Работы в этой области должны явиться важным продолжением деятельности лаборатории. Морские донные отложения обычно считаются конечным приемником большинства химических элементов, которые участвуют в различных геохимических процессах как в море, так и на суше. Однако известно также, что различные элементы могут

участвовать в круговороте веществ в результате реакций воды с отложениями, а также в результате биологического взаимодействия с морскими организмами. Необходимо лучше понять механизмы и масштаб таких потенциальных процессов циклического участия. Данная программа представляет особую важность в плане исследования весьма отдаленных последствий загрязнения и конечной судьбы сбрасываемых в морскую среду веществ, которая зависит от реакций, происходящих на поверхности раздела донных отложений с океанскими водами. Эти проблемы требуют особого изучения с геохимической точки зрения.

Международное сотрудничество

Монакская лаборатория принимает ученых, приезжающих в научные годичные отпуска, и стажеров, в основном из развивающихся стран. Подготовка научных кадров считается важным разделом поддерживаемой ЮНЕП деятельности в Средиземноморье и других районах, которая осуществляется в рамках Региональной программы изучения морей.

Эти поддерживаемые ЮНЕП работы, которые составляют 20% объема работ лаборатории, осуществляются в тесном сотрудничестве с другими национальными организациями, научными учреждениями, расположенными в Средиземноморье и других районах. В рамках этой программы сотрудничества в лаборатории работает инженер по электронике, ответственный за установку и обслуживание измерительных приборов, таких, как газовые хроматографы, атомно-абсорбционные спектрофотометры, приборы для измерения скорости и направления течений и т.д. Эта работа имеет особое значение для тех развивающихся стран, которые вовлечены в нее. Кроме того, лаборатория в сотрудничестве с Научным центром Монако создала в 1975 году группу по обслуживанию электронной аппаратуры, выполняющую ремонт и техническое обслуживание сложнейших электронных приборов как лабораторий, так и Научного центра Монако.