

МОРСКАЯ РАДИОЭКОЛОГИЯ И ОКЕАНОГРАФИЯ

Г.Г. Поликарпов

Морская радиоэкология, будучи тесным образом связанной с морской экологией и биогеохимией, характеризуется многими чертами океанографической дисциплины.

Океанографический характер радиоэкологических исследований проявляется при изучении роли морской океанической жизни в распределении, круговороте и миграции естественных и искусственных радиоактивных веществ в различных районах Мирового океана.

Механизм поглощения и накопления радиоактивных веществ морскими организмами может рассматриваться как с биофизической, так и с радиоэкологической точки зрения. В первом случае основное внимание обращается на физико-химические свойства живых структур и протекающие в них процессы, которые обеспечивают проницаемость для веществ из внутренней или внешней среды [11, 14]. При этом калию и натрию, а также кальцию и немногим другим элементам, ионам и комплексам, отводится основное место. Радиоэкологию интересует, в первую очередь, судьба всех радионуклидов и радиоэлементов, взаимодействующих с живыми организмами, т.е. процессы их поглощения и накопления не только и не столько простейшими или изолированными живыми системами /эритроцитами, кожей и т.д./, а целыми организмами и биоценозами путем изотопного обмена с раствором, поверхностной адсорбции и по пищевой цепи. В этом отношении решаются следующие основные вопросы, связанные с радиоэкологическими сторонами механизма поглощения и накопления: 1/ характеристика радиоэкологической ситуации в среде и ее изменение во времени; 2/ как, почему, до какой степени и в течение какого времени происходит накопление радионуклидов отдельными видами водных организмов и биоценозами; 3/ каково влияние на процессы поглощения и накопления физико-химического состояния и хими-

ческой формы радионуклида и его изотопного и неизотопных носителей, концентрации носителей, экологических факторов среды /температура, свет и т.д./; 4/ какова роль биологического фактора в миграции и распределении радионуклидов и радиоэлементов в отдельных водоемах и гидросфере в целом.

Попытаемся в какой-то мере осветить исходные понятия и основные элементы морской радиоэкологии.

В настоящее время большинство исследователей в области как экспериментальной, так и полевой радиоэкологии водных организмов используют в качестве исходного понятия, характеризующего поглощение и аккумуляцию радионуклидов, коэффициент накопления, представляющий собой отношение концентраций того или иного радионуклида в организме и водной среде. Его применение, разумеется, не конкурирует с использованием других количественных способов выражения концентрирующей способности организмов при решении отдельных специальных вопросов. Однако коэффициент накопления является единственным универсальным мерилем накопления химических элементов и их радионуклидов, т.е. он имеет наиболее простой смысл: во сколько раз водный организм накапливает радионуклида больше /на единицу живого веса/, чем его содержится в окружающей воде /на единицу объема, или веса/.

Действительно, далеко не для всех радионуклидов можно пользоваться понятием удельной активности, выражаемой как отношение числа атомов радионуклида к общему числу атомов соответствующего химического элемента, так как для многих элементов неизвестна концентрация и физико-химическое состояние изотопного носителя в организме и воде.

Аналогично такое важное понятие, как коэффициент дискриминации /отношение коэффициентов накопления двух родственных радионуклидов или их неизотопных носителей/ можно применять в ограниченных случаях, в основном для стронция и цезия.

Большинство исследователей выражают коэффициенты накопления в расчете на живой /сырой/ вес. Это имеет преимущества перед переводом на сухой вес, золу и т.д., так как позволяет оценивать роль живых организмов в накоплении радионуклидов и оценивать дозы излучений, получаемых живыми тканями. Разумеется, в некоторых специальных случаях имеет смысл приводить коэффициенты накопления также к сухому весу или весу золы.

Применение всеми водными радиоэкологами понятия коэффициент накопления /на живой вес/ принесет несомненную пользу, так как позволит сравнивать результаты различных авторов.

На основании коэффициентов накопления выведены разнообразные соотношения [7], которые дают возможность переходить от одних параметров, имеющих отношение к аккумуляции, к другим расчетным путям. Это в значительной степени должно уменьшить трудоемкость радиоэкологических исследований. Однако они могут применяться с уверенностью пока лишь в морской радиоэкологии в связи с большой стабильностью химического состава водной среды в морях и океанах.

Поглощение является процессом вхождения радионуклидов в организм, а накопление - его результатом. Следует отметить, что мы не наблюдаем истинной картины поступления, так как одновременно совершается процесс выведения. Поэтому поглощение и накопление - это разность между поступлением и выведением. Процесс выведения легко поддается прямому изучению.

Изотопный обмен состоит в обмене атомов /ионов или комплексов/ радионуклида на атомы /ионы или комплексы/ того же самого химического элемента /его стабильных изотопов/ и, наоборот, при сохранении постоянной концентрации данного химического элемента, находящегося в одинаковом физическом состоянии и химической форме с вносимым радионуклидом, в воде. Если изотопный носитель отсутствует /или находится в другом состоянии и форме/ или увеличивается общая концентрация данного химического элемента в воде при внесении радионуклида /с изотопным носителем/, то поглощение и накопление будут определяться его концентрацией и наличием неизотопных носителей. Этот процесс в отличие от изотопного обмена, можно назвать проницаемостью.

Целым рядом исследователей разных стран изучалась зависимость накопления различных радионуклидов пресноводными и морскими организмами от концентрации изотопных и неизотопных носителей. Особая заслуга в получении и обобщении большого материала по этому вопросу принадлежит Н.В. Тимофееву-Ресовскому [9]. Приводимое ниже правило не только достаточно обосновано экспериментально, но и логически вытекает из основного радиохимического закона Хлопина [8].

Правило 1. В области микроконцентраций /вплоть до 10^{-6} - 10^{-4} моль/л/ при прочих равных условиях концентрация химического элемента в гидробионте прямо пропорциональна таковой в воде, т.е.

коэффициенты накопления не зависят от концентрации /до этого предела/.

Следствие 1. Если при внесении радионуклида, имеющего изотопный носитель, концентрация последнего не меняется в воде или меняется в пределах микроколичеств, то при прочих равных условиях коэффициенты накопления этого радионуклида /и носителя/ остаются постоянными.

Следствие 2. Если в пределах микроконцентраций меняется физико-химическое состояние и форма химического элемента /радионуклида/, то меняются и коэффициенты накопления Э.А. Гилевой [27] показано, что при концентрации иттрия 10^{-6} моль/л происходит образование гидроокиси иттрия, и коэффициенты накопления его кладофорой уменьшаются в два раза. Аналогичное явление предполагается ею и для прометия.

Следствие 3. В области макроколичеств в воде неизотопные носители уменьшают коэффициенты накопления радионуклида водными организмами. Поэтому, если концентрация неизотопных носителей - величина переменная, то коэффициенты накопления радионуклида в гидробионте не имеют смысла без сведений о концентрации неизотопных носителей в воде.

Физико-химическое состояние различных радионуклидов /химических элементов/ изучено очень слабо. Еще меньше данных о его роли в поглощении и накоплении радионуклидов водными организмами. В настоящее время можно считать, что стронций и цезий не меняют ионной формы, в которой находится большинство их атомов в растворе. С. Кечкеш и сотрудники [16] показали, что рутений-106 в виде нитратного комплексного соединения аккумулируется в 40 раз с меньшими коэффициентами накопления в мидиях, чем в хлоридной комплексной форме. Трехвалентный хлорид хрома переходит в морской воде в его гидроокись и выпадает в осадок, тогда как пятивалентный хромат натрия остается в растворе и накапливается морскими червями [13]. Хорошим средством изучения и воздействия на поведение металлов в водных растворах служат комплексообразующие соединения. ЭДТА резко уменьшает величины коэффициентов накопления радионуклидов иттрия, церия, цинка, кобальта, кадмия и железа; несколько понижает их у циркония, ниобия, рутения, иода, рубидия и кальция; увеличивает коэффициенты накопления цезия и стронция пресноводными растениями и животными. Первые шесть элементов имеют очень высокие константы устойчивости комплексов с

ЭДТА. Кальций характеризуется большей константой устойчивости, чем стронций. Поэтому его коэффициенты накопления снижаются под влиянием ЭДТА, а стронций /в качестве аналога кальция/ накапливается в организме. Изменение коэффициентов накопления остальных радионуклидов связано, по-видимому, с резким нарушением кальциевого и, следовательно, общего механизма минерального обмена [10].

Почти отсутствуют данные о роли природных биоконплексонов в процессах накопления радионуклидов водными организмами. Р. Джонс [15] полагает, что разница в накоплении рутения-106 ламинарией, ульвой и порфирой обусловлена разным содержанием экстрагирующейся альгиновой кислоты в их клеточных поверхностях. Возможно, фукус выделяет в морскую воду вещества, которые препятствуют адсорбции железа-59 [20].

Данные по влиянию pH раствора на накопление различных радионуклидов водными организмами еще немногочисленны и противоречивы. В отличие от пресных вод /pH изменяется в пределах от 7, 6 до 10/ pH морской воды - величина постоянная.

Данных по температурному и световому факторам в водной радиоэкологии очень мало. Для некоторых радионуклидов характерен температурный коэффициент, близкий к 1 /например, церий-144 в бурых водорослях/, что свидетельствует об адсорбционных процессах. По отношению к свету химические элементы делятся на две группы: индифферентные к свету и накапливающиеся при освещении. Однако материала по этим вопросам еще недостаточно, чтобы делать какие-либо выводы.

Весьма интересно, что, например, стронций-90 накапливается убитыми /нагреванием, кипящим этиловым спиртом/ бурными водорослями так же, как и живыми. Следовательно, за процесс его поглощения и накопления ответственны не сами жизненные процессы, а довольно стабильные структуры, сохраняющиеся длительно после гибели водоросли. Когда же водоросли начинают распадаться, происходит обратный процесс выхода стронция-90 в окружающую воду. Таким образом, механизм разделения близких элементов /стронция и кальция/ не связан с процессами самой жизнедеятельности, а с более простыми реакциями в специальных структурах. Понимание механизма дискриминации против кальция в пользу стронция в бурных водорослях может помочь выяснить механизм полного разделения стронция и кальция в акантариях, строящих свой скелет только из сульфата стронция.

Графический материал различных исследователей по изменению накопления радионуклидов морскими организмами во времени в большинстве случаев показывает, что этот процесс совершается по прямой линии /в логарифмических координатах/ до постоянного уровня - стационарного, или равновесного состояния. Специальными исследованиями этого вопроса, выполненными Г.В. Бариновым [4], установлено, что как процессы поглощения, так и процессы выведения описываются не экспоненциальной зависимостью /как принято думать/, а более сложными функциями: логарифмической, степенной /преобладает/ и степенно-логарифмической. В общем виде эта закономерность объясняется большим набором отдельных элементарных процессов, каждый из которых подчиняется экспоненциальному закону. Подробно данный вопрос освещен в нашем докладе на Стокгольмском симпозиуме [6]. Аналогичное явление описано законом Вей-Вигнера: смесь радионуклидов, образовавшаяся после ядерного взрыва, распадается по степенной зависимости /тогда как количество каждого радионуклида уменьшается по экспоненте/. Экспоненциальное распределение констант распада приводит к степенному закону падения радиоактивности сложной смеси радионуклидов.

Таким образом, имеется основание сформулировать следующее правило.

Правило 2. Кинетика поглощения и выведения радионуклида водными организмами описывается не экспоненциальным, а более сложными законами /логарифмической, степенной, степенно-логарифмической функциями/.

Изучение кинетики изотопного обмена и лежащих в его основе энергетических процессов позволяет подойти к непосредственному изучению природы и закономерностей поглощения, накопления и выведения радионуклидов /химических элементов/ водными растениями и животными.

Водные растения извлекают химические элементы и их радионуклиды из воды. Каким путем получают их водные животные?

Весьма заманчиво по чисто внешней аналогии с сухопутными животными объяснять попадание радиоактивных веществ в организм водных животных с пищей. Однако первые же исследования показали, что водные животные даже в кратковременных опытах без кормления становились радиоактивными в растворах радионуклидов. Затем радиоэкологи разделились на сторонников и противников пищевого фактора как ос-

новного источника /по сравнению с прямым поглощением из окружающей воды/ радиоактивных веществ для водных животных.

В пользу сторонников свидетельствуют "очевидность" /яркие схемы пищевых связей/ и опыты с очень густыми суспензиями водорослей, идущих в пищу беспозвоночных, или кормлением пресноводных пищевой массой с внесением в нее стронция-90.

В пользу противников говорит совпадение коэффициентов накопления радиоактивных и стабильных нуклидов при голодном содержании водных животных в радиоактивном растворе и при обитании в природных условиях.

Согласно работе [17] содержание радиостронция в организме *Sarassius auratus* из воды и пищи становится одинаковым при коэффициенте накопления стронция в пищевом материале 100 ед. Коэффициенты накопления стронция в кормовых морских организмах и рыбах гораздо меньше 100 ед. Многие из пресноводных животных, входящих в пищевую рацион рыб, отличаются также небольшими коэффициентами его накопления. Так, личинки хирономуса имеют коэффициент накопления стронция-90, равный 9 [21].

Очевидно, животные получают с пищей как богатые энергией вещества, так и специфические органические соединения, необходимые для процессов их жизнедеятельности. Иными словами, вырисовывается следующая картина.

Пробное обобщение 1. В широком диапазоне коэффициентов накопления /до 100 ед./ и обычных биомасс пищевых организмов основным источником большинства радионуклидов /химических элементов/ для водных, особенно морских организмов служит вода. Исключение представляет собой углерод в виде сложных соединений, органический фосфор и, возможно, немногие другие химические элементы, входящие в состав биологически активных соединений. Остальные минеральные вещества водные животные поглощают непосредственно из воды.

Это пробное обобщение сделано, чтобы привлечь внимание к излагаемому здесь важному, но еще достаточно не изученному вопросу.

Все сказанное выше относится к первичным обитателям водной среды. Китообразные и морские птицы в океане, береговые млекопитающие и птицы пресных водоемов должны изучаться с учетом того, что их тело непроницаемо и что все химические вещества с пищей и водой поступают через желудочно-кишечный тракт. Но опять-таки и в этом случае трудно предвидеть априори: какой вклад будет больше - из радиоактивной воды или радиоактивной пищи.

Само собой разумеется, что, когда в окружающей среде отсутствуют радионуклиды, а организмы являются радиоактивными, пищевые цепи становятся единственным путем поглощения и дальнейшей миграции радиоактивных веществ.

На основании обобщения всего опубликованного материала по коэффициентам накопления различных радионуклидов в близкородственных видах, обитающих в самых различных морях и океанах, можно сделать такой вывод [6].

Правило 3. Коэффициенты накопления /в состоянии равновесия/ каждого отдельного радионуклида близкородственными видами морских растений и животных /в пределах рода и семейства/ достоверно не отличаются друг от друга для различных морей и океанов с разной соленостью /от 35 до 17‰/.

Это правило весьма облегчает как использование соответствующих данных, полученных в различных эколого-географических условиях, так и их экстраполяцию на другие, непосредственно еще не изучавшиеся районы Мирового океана.

Хотелось бы обратить внимание также на проведенное нами сравнение величин коэффициентов накопления, полученных по единой методике, для некоторых дальнородственных морских и пресноводных организмов [4]. Выяснилось, что величины коэффициентов накопления цезия-137, стронция-90 и серы-35 в морских гидробионтах были, как и следовало ожидать /макроколичества носителей/, примерно на порядок величин меньше, чем в соответствующих пресноводных организмах. Коэффициенты накопления радионуклидов иттрия и церия в родственных морских и пресноводных организмах оказались близкими в связи, по-видимому, с микроконцентрациями изотопных носителей.

Пробное обобщение 2. Коэффициенты накопления радионуклидов, носители которых находятся в воде в микроколичествах, близки для родственных морских и пресноводных организмов.

Рассмотрим общие вопросы распределения радионуклидов между водными биоценозами и водной средой [5].

Правило 4. В большом диапазоне биомасс /до 100 г/м³/ и величин коэффициентов накопления /до 1000 ед./ на долю живых организмов приходится ничтожная доля радионуклидов химических элементов, находящихся в воде.

Действительно, если бы дело обстоит иначе, то морская вода превратилась бы в дистиллированную воду. Близкую картину можно наб-

людать на болотах, в воде которых крайне мало солей в связи с очень большой долей растений и органических остатков.

Однако в море можно назвать ситуации, при которых на долю обитателей биоценозов приходится значительная часть радионуклидов. Это прежде всего гипонейстонный /по определению Ю.П. Зайцева/ биоценоз саргассовых водорослей, придонный биоценоз филлофторы, прибрежные заросли фукусовых. В слое или объеме обитания, в зависимости от свойств биоценоза, в перечисленных случаях концентрируется огромная биомасса в среднем до нескольких килограмм на 1 м^3 . Таким образом, доминирующие виды этих биоценозов, отличающиеся не только высокими коэффициентами накопления, но и высокой биомассой, являются не только биоиндикаторами радиоактивных веществ, но и их биоконцентраторами.

Разумеется, характер распределения радионуклидов /химических элементов/ между сообществами организмов и водной средой в какой-то момент времени не отражает радиоэкологического /биогеохимического/ механизма миграции радиоактивных веществ в гидросфере, основными элементами которого являются воспроизводство и отмирание массовых гидробионтов, т.е. круговорот живого вещества. Значительную роль могут играть в условиях мелководья /до 100 м/ временные обитатели приповерхностного слоя - гипонейстона, описанного Ю.П. Зайцевым [3]. В результате непрерывных миграций со дна к поверхности и обратно эти организмы могут служить в качестве своего рода насоса, медленно, но непрерывно перекачивающего радиоактивные вещества из одного слоя водоема в другой.

Наконец, исследования радиоэкологического фактора искусственного происхождения, проведенные в различных морях и пресных водоемах, установили постепенное нарастание концентрации и общего количества стронция-90 и цезия-137 до последнего времени как в водной среде, так и гидробионтах. В.П. Парчевский нашел математическую зависимость, описывающую изменение концентрации стронция-90 в морских организмах за последние годы [6, 12, 18, 19].

Другой области морской радиоэкологии, связанной с действием радиоактивных веществ на популяции и сообщества гидробионтов и их биологическую продуктивность также свойствен океанографический характер. При этом очень важны исследования, направленные на выяснение участия радиоэкологического фактора естественного и искусственного происхождения в формировании и изменении биологичес-

кой структуры морей и океанов. Показано, что морские рыбы южных широт с быстрым развитием являются радиочувствительными на ранних стадиях эмбриогенеза. Большое внимание уделяется новой области радиоэкологии - радиоэкологии гипонейстона, распределенного в приповерхностном слое всех морей и океанов.

Особое значение эти исследования приобретают в борьбе против дальнейшего радиоактивного загрязнения Мирового океана отходами атомных производств.

Таким образом, можно констатировать, что, во-первых, морская радиоэкология не только опирается на биофизические механизмы поступления химических элементов /радионуклидов/ в клетки и ткани, но и приступает к разработке более сложных, радиоэкологических механизмов взаимодействия с радиоактивной средой организмов и их биоценозов; во-вторых, радиоэкология морских организмов переходит к этапу обобщения и поисков общих закономерностей; в-третьих, морская радиоэкология становится одной из важных областей международного научного сотрудничества.

Л и т е р а т у р а

1. Баринов Г.В. - Гидробиол. журн., 1965, 1/2/, 27-34.
2. Гилева Э.А. - Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, 1965, /45/, 5-31.
3. Зайцев Ю.П. - Зоол. журн., 1961, 40/6/, 818-825.
4. Поликарпов Г.Г. - Тр. Севаст. биол. ст., 1961, 14, 314-328.
5. Поликарпов Г.Г. Радиоэкология морских организмов. Атомиздат, М., 1964, 295.
6. Polikarpov G.G., Zaitsev Yu.P., Barinov G.V., Parchevsky V.P. - In: Internat. Sympos. on Radioecol. Concentr. Processes. Pergamon Press, London, 1966.
7. Поликарпов Г.Г. и Зесенко А.Я. - Океанология, 1965, 5/6/, 1099-1107.
8. Старик И.Е. Основы радиохимии. Изд-во АН СССР, М.-Л., 1960, 459.
9. Тимофеев-Ресовский Н.В. - Ботан. журн., 1957, 42/2/, 1961-1964.
10. Тимофеева-Ресовская Е.А. - Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, 1963, /30/, 1-78.
11. Трошин А.С. Проблема клеточной проницаемости. Изд-во АН СССР, М.-Л., 1956, 474.

12. Agnedal P.O. - In: Internat. Sympos. on Radioecolog. Concentr. Processes. Pergamon Press, London, 1966.
13. Chipman W.A. - In: Internat Sympos. on Radioecolog. Concentr. Processes Pergamon Press, London, 1966.
14. Harris E.J. Transport and accumul. in biolog. systems. 2nd ed BSP, London, 1960, 279.
15. Jones R.F. - Oceanogr., 1960, 5 (30), 312-315.
16. Kečkeš., Pučar z. and Marazovič Lj. - In: Internat Sympos. on Radioecol. Concentr. Processes. Pergamon Press, London, 1966.
17. Ophel I.L. and Judd J.M. - In: Internat Sympos. on Radioecol. Concentr. Processes. Pergamon Press, London, 1966.
18. Salo A. and Voipio A. - In: Internat Sympos. on Radioecol. Concentr. Processes Pergamon Press, London, 1966.
19. Schreiber B. - In: Internat. Sympos. on Radiecol. Concentr. Processes. Pergamon Press, London, 1966.
20. Taylor W.R. and Odum E.P. - Biol. Bull., 1960, 119 (2), 343.
21. Templeton W.L. - In: The Effect of Pollution on Living Material Inst. of Biology, L. Sept. 1958, 8, 125-140.