

Шеремин

АКАДЕМИЯ НАУК УССР

Объединенный ученый совет биологических наук

✓

Г. Г. ПОЛИКАРПОВ

ПРОБЛЕМЫ МОРСКОЙ РАДИОЭКОЛОГИИ

*Автореферат
диссертации на соискание
ученой степени
доктора биологических наук*

АКАДЕМИЯ НАУК УССР
Объединенный ученый совет биологических наук

Г. Г. ПОЛИКАРПОВ

ПРОБЛЕМЫ МОРСКОЙ РАДИОЭКОЛОГИИ

*Автореферат
диссертации на соискание
ученой степени
доктора биологических наук*

Работа выполнена в отделе радиобиологии Института биологии южных морей им. А. О. Ковалевского АН УССР.

Защита состоится 29/IV 1964 г. на заседании Объединенного ученого совета биологических наук Академии наук Украинской ССР. Отзывы и замечания просим присылать по адресу: г. Киев, ул. Владимирская, 55, Объединенный ученый совет биологических наук АН УССР, ученому секретарю

Автореферат разослан 28/III 1964 г.

Возникновение радиоэкологии морских организмов явилось закономерным этапом развития радиобиологии в условиях века атомной энергии. Появление в природе нового и весьма специфичного фактора — ионизирующих излучений искусственно-радиоактивных веществ — потребовало постановки радиобиологических исследований на экологическом уровне.

Наряду с интенсивным радиоактивным загрязнением гидросферы в результате выпадения атмосферных радиоактивных осадков после проведения ядерных испытаний до Московского договора об их прекращении в космосе, атмосфере и под водой (1963 г.), чрезвычайно большим стимулом к быстрому развитию морской радиоэкологии послужила острая проблема удаления промышленных радиоактивных отходов в океаны и моря. В связи с этим возник круг вопросов по выяснению радиационной опасности радиоактивного загрязнения гидросферы для жизни моря и его биологической продуктивности.

Решение указанной кардинальной радиоэкологической проблемы должно основываться на достижениях в области теоретической морской гидробиологии — учении о биологической продуктивности морей, развитом в трудах С. А. Зернова, Л. А. Зенкевича, Г. Г. Винберга, В. А. Водяницкого, В. С. Ивлева и других.

Вопрос о возможности использовать глубины Черного моря для удаления радиоактивных отходов ставится представителями США с 50-х гг. В специальной работе «Опасности атомных отходов. Перспективы и предложения по океаническому захоронению» Олтон Фрай, советник сенатора Томаса Додда по политике в области науки, например, заявляет: «Особенно интересной морской акваторией в этом отношении

является Черное море, которое, как полагают, содержит наиболее изолированные и древние глубинные воды на земном шаре» (О. Frye, 1962, р. 17). Проблема удаления радиоактивных отходов в глубины Черного моря, как и другие моря и океаны, продолжает обсуждаться в различных кругах, включая международные организации (МАГАТЭ).

Советскими учеными (В. А. Водяницким, 1958; А. К. Богдановой, 1959; Б. А. Скопинцевым, 1959) показано, что время подъема придонных вод в Черном море составляет всего лишь 60—130 лет, а не 2500—5000 лет, как полагали раньше.

Проблемы удаления отходов атомных производств в океанические впадины и в моря южного полушария связаны с большими количествами радиоактивных отходов высокой активности. Что касается отходов среднего и низкого уровня активности (в каждой стране свои представления об этих диапазонах), то они решаются США, Англией и Францией весьма «просто»: США сливают жидкие радиоактивные отходы в крупные реки (например, р. Колумбию), а твердые сбрасывают в Мексиканском заливе и вдоль своего побережья Атлантического и Тихого океанов; Англия выпускает радиоактивные растворы в Ирландское море, а твердые погружает на дне пролива Ла-Манш и в северо-западной части Атлантического океана; Франция удаляет жидкие отходы ядерных установок в р. Рону, откуда они скатываются в Средиземное море, а твердые планируют подвергать захоронению во впадинах этого моря. Целый ряд других стран также приступили (или предполагают это сделать) к загрязнению радиоактивными отходами своих морских акваторий: Швеция — Балтийского моря, Италия — Средиземного моря, Япония — Японского моря и районов Тихого океана, Индия — Аравийского моря.

Наряду с приведенными выше исследованиями в области гидробиологии и океанологии, необходимой базой для формирования морской радиоэкологии послужили важнейшие работы по экологическим аспектам радиобиологии, выполненные в крупных научных центрах в Советском Союзе, возглавляемых В. М. Ключевским, В. П. Шведовым, Е. М. Крепсом, Н. В. Тимофеевым-Ресовским, В. И. Жадиным и другими. Большое принципиальное и методическое значение для радиоэкологии имеют работы того же направления Института биофизики АН СССР и Института биохимии им. А. Н. Баха АН СССР под руководством И. Н. Верховской, А. М. Кузина, А. А. Передельского; а также исследования сотрудников

Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР, Института океанологии АН СССР, Московского университета им. М. В. Ломоносова и других научных учреждений, группирующихся вокруг ведущих ученых В. И. Баранова, В. Г. Богорова, А. П. Виноградова, В. С. Емельянова, Л. А. Зенкевича, А. В. Лебединского, О. И. Лейдунского.

Назревшая необходимость развертывания эколого-радиобиологических работ на морях и океанах была обоснована В. А. Водяницким, Л. А. Зенкевичем, Е. М. Крепсом, П. А. Моисеевым, Г. А. Середой, В. П. Шведовым, М. Фонтэном (M. Fontaine), В. Чипмэном (W. Chipman) и другими.

Таким образом, для развития морских радиоэкологических исследований имеется основание в виде значительных достижений гидробиологии, океанологии, экологической радиобиологии и стимул в виде насущной потребности предвидения биологических последствий в морях и океанах в результате происходящего и потенциального радиоактивного загрязнения гидросферы.

На основании собственных и литературных данных о накоплении и действии радиоактивных веществ на морские организмы в настоящей диссертации предпринята попытка систематического изложения основных понятий, зависимостей и материала по взаимодействию между радиоактивной средой и морскими организмами.

* * *

Диссертация состоит из двух томов (478 страниц, 146 таблиц и рисунков), включающих введение, раздел первый «Радиоактивное загрязнение морей и океанов» с четырьмя главами («Испытания ядерного оружия», «Радиоактивные отходы и аварии атомных реакторов», «Атомный флот», «Содержание искусственно-радиоактивных веществ в морях и океанах»), раздел второй «Предмет, задачи и методы морской радиоэкологии» с двумя главами («Предмет и задачи», «Методы и объекты»), раздел третий «Накопление радиоактивных веществ морскими гидробионтами» с 11 главами («Коэффициенты накопления и их зависимость от факторов среды», «Накопление радиоизотопов I группы химических элементов периодической системы», «Накопление радиоизотопов II группы химических элементов периодической системы», «Накопление радиоизотопов III группы химических элементов периодической системы», «Накопление радиоизотопов IV

группы химических элементов периодической системы», «Накопление радиоизотопов V группы химических элементов периодической системы», «Накопление радиоизотопов VI группы химических элементов периодической системы», «Накопление радиоизотопов VII группы химических элементов периодической системы», «Накопление радиоизотопов VIII группы химических элементов периодической системы», «Общий обзор коэффициентов накопления радионуклидов в морских организмах», «Роль гидробионтов в миграции радиоактивных веществ», раздел четвертый «Действие ядерных излучений на морские организмы» с четырьмя главами («Радиобиологический смысл коэффициентов накопления», «Лучевое поражение гидробионтов при однократном внешнем облучении», «Действие на гидробионты хронического облучения ионизирующими излучениями», «Об опасности радиоактивных загрязнений для жизни моря и его биологической продуктивности»), заключение, основные выводы и список литературы (626 работ). Многие главы делятся на параграфы, а последние — на пункты. В конце каждого раздела приводятся краткие итоги.

* * *

В разделе первом рассмотрены основные источники радиоактивного загрязнения гидросферы: испытательные взрывы ядерного оружия, радиоактивные отходы атомных производств и атомного флота, а также аварии береговых и судовых реакторных установок. По нашим подсчетам, в процессе испытаний ядерного оружия в моря и океаны внесено к 1963 г. только стронция-90 и цезия-137 несколько десятков миллионов кюри. При полном прекращении испытательных взрывов в морях, атмосфере и космосе с 1963 г. максимум радиоактивного загрязнения поверхности земного шара этими радионуклидами будет достигнут около 1970 г., а затем последует ее уменьшение за счет радиоактивного распада, и лишь через несколько веков количество стронция-90 и цезия-137 упадет в 1000 раз от максимального количества.

Второй по значению источник радиоактивного загрязнения гидросферы — отходы атомных предприятий — действует уже около двух десятков лет (с 1946 г. по инициативе США). За этот период времени в акватории Тихого и Атлантического океанов, Мексиканского залива, Ирландского, Средиземного и других морей сброшено и слито по далеко не

полным данным несколько миллионов кюри радиоактивных веществ (в момент удаления).

Быстрый рост атомного надводного и подводного флота ведет, тем самым, к созданию еще одного серьезного источника радиоактивного загрязнения морской воды, которое к 1970 г. оценивается в несколько миллионов кюри ежегодно (считая на момент сброса).

Трагедия, происшедшая в Атлантическом океане с крупной подводной лодкой США «Трешер», показала наличие нового громадного потенциального источника загрязнения морей — аварий кораблей-атомоходов. Активность реакторного топлива всего предполагаемого в 1970 г. атомного флота должна составить миллиарды кюри.

Содержание стронция-90 в морской воде измерялось в 1960 году порядка 10^{-12} и даже 10^{-11} кюри/л (Тихий океан и Ирландское море) и 10^{-13} кюри/л (Атлантический океан). Такие же концентрации в воде Тихого океана и Ирландского моря характерны и для цезия-137. Активность других радионуклидов в них доходила в 1959 г. до 10^{-10} (церий-144, цирконий-95 — ниобий-95) и даже до 10^{-9} кюри/л (рутений-106).

Из перечня источников и уровней радиоактивного загрязнения гидросферы следует, что искусственно-радиоактивные вещества приобрели характер экологического фактора среды в морях и океанах.

* * *

Первые публикации, содержащие новое понятие «радиоэкология», появились одновременно в СССР (А. М. Кузин, А. А. Передельский, 1956) и в США (Е. Р. Odum, 1956). Насколько нам известно, первое определение радиоэкологии предложено А. А. Передельским (1957). В настоящее время радиоэкология, как самостоятельная область исследований, получила заслуженное признание. Крупные научные радиобиологические журналы имеют специальные разделы по радиоэкологии. Радиоэкологической по своему существу явилась Всесоюзная конференция по изучению радиоактивного загрязнения морей и океанов и их пищевых ресурсов в Москве в декабре 1960 г. В сентябре 1961 г. состоялся первый в США симпозиум по радиоэкологии.

Принадлежность радиоэкологии к радиобиологическим наукам со всей убедительностью показана А. М. Кузиным (1962).

Очевидно, для познания целого ряда радиоэкологических закономерностей необходимо привлечение методов и понятий биогеохимии, созданной В. И. Вернадским и его школой (А. П. Виноградов, В. И. Баранов, В. В. Ковальский и др.). Только в тесном содружестве трех наук: радиобиологии, экологии и биогеохимии — можно решать радиоэкологические проблемы, которые, несмотря на свою многогранность и сложность, имеют конечной целью выяснение, количественную характеристику и предвидение действия человека на природу и, тем самым, на самого себя, через создание радиоэкологического фактора эдафической среды в биосфере, точнее, — в ионосфере.

Для морской радиоэкологии характерны три аспекта исследований: 1) систематическое изучение содержания искусственно-радиоактивных веществ и соответствующих им носителей в важнейших морских гидробионтах из различных акваторий морей и океанов (характеристика радиоэкологической ситуации в природе); 2) экспериментальное изучение накопления и отдачи радиоактивных веществ массовыми морскими организмами (предвидение уровней накопления в природе различных радионуклидов при определенных концентрациях последних в морской воде) и 3) изучение биологического действия малых доз различных радиоизотопов на процессы жизнедеятельности, размножение и развитие морских гидробионтов, структуру и биомассу их популяций и биоценозов (предсказание опасности определенных уровней радиоактивного загрязнения морской воды для биологической продуктивности и жизни моря). При этом два первых аспекта вместе составляют одну сторону теоретической проблемы взаимодействия между морскими организмами и радиоактивной средой, а именно: действие гидробионтов на радиоактивную среду, изучение которого позволяет устанавливать роль популяций и биоценозов морских существ в миграции и распределении радиоактивных веществ в морях и океанах. Третий аспект отражает обратную сторону этого взаимодействия: действие радиоактивной среды на морские организмы. Изменение вследствие такого влияния структуры и биомассы популяций и биоценозов в свою очередь может приводить к изменению миграции радиоактивных веществ биологическим путем.

Очевидно, что перечисленные три аспекта морских радиоэкологических исследований теснейшим образом связаны друг с другом, взаимно дополняют и зависят друг от друга. Успе-

хи каждого из них способствуют развитию других. Иными словами, имеется возможность целостного изложения проблем и достижений в области морской радиоэкологии, как науки о закономерностях взаимоотношения между радиоактивной средой и морскими гидробионтами.

Методика изучения поглощения, накопления, распределения и выделения радионуклидов гидробионтами состоит из следующих этапов: приготовление рабочих растворов радиоизотопов, выбор необходимого и достаточного объема морской воды, подготовка аквариумов и гидробионтов к опыту, отбор проб и их обработка, выбор радиометрического метода измерения радиоактивности препаратов, расчет конечных величин. В диссертации дается подробное их описание и приводится детальная характеристика радионуклидов, с которыми нами проводились исследования. Из 18 радионуклидов, использованных в настоящей работе, только три (золото-198, германий-71 и хром-51) содержали в исходном растворе такое количество изотопного носителя, что в аквариальной морской воде нарушались природные концентрации этих элементов. К ним же следует также отнести уран-238, как слабо радиоактивный элемент с большой «весомостью». Все остальные изотопы (цезий-137 — барий-137, кальций-45, стронций-90 — иттрий-90, иттрий-91, церий-144 — празеодим-144, празеодим-143, цирконий-95 — ниобий-95, фосфор-32, сера-35, йод-131, железо-59, кобальт-60 и рутений-106 — родий-106) удовлетворяют предъявляемому к ним требованию: при внесении активного раствора сохранять существующие концентрации соответствующих им стабильных химических элементов в морской воде.

Исследованию с различными изотопами подвергались морские одноклеточные водоросли, водоросли-макрофиты, морские цветковые растения, кишечнорастворимые, многощетинковые черви, ракообразные, моллюски, взрослые рыбы и их икра. При изучении биологического действия излучений радиоизотопов основное внимание обращалось на точность приготовления различных концентраций, содержание и статистическую обработку получаемых данных. Объектами исследования служили одноклеточные водоросли и развивающаяся икра рыб.

* * *

В научной литературе отсутствуют полные сводки и обобщения разрозненных данных по коэффициентам накопления

в морских гидробионтах как осколочных, так и наведенных нейтронами радионуклидов, относящихся к I, II, III, IV, V, VI, VII и VIII группам химических элементов периодической системы. Начало сбора такого материала было положено как нашими обзорами по результатам собственных исследований в области коэффициентов накопления цезия-137, стронция-90, иттрия-91, празеодима-143, церия-144, фосфора-32 и серы-35 в растениях и животных Черного моря (Г. Г. Поликарпов, 1960, 1961), так и двумя другими специальными сводками, в которых представлены результаты расчета, исходя из опубликованных биогеохимических данных, коэффициентов накопления ряда стабильных элементов, радиоизотопы которых имеют радиоэкологическое значение, в промысловых гидробионтах, обитающих близ берегов Англии (J. Mauchline, 1961) и Японии (R. Ichikawa, 1961). В последней работе содержатся также некоторые сведения о коэффициентах накопления цезия-137 и стронция-90.

Попытка свести воедино и проанализировать имеющийся в настоящее время материал по коэффициентам накопления осколочных и наведенных радионуклидов, включая и соответствующие им стабильные изотопы, в гидробионтах различных морей и океанов предпринимается в третьем разделе диссертации.

В начале этого раздела излагаются в систематизированном виде сведения о соотношениях между различными единицами, характеризующими способность гидробионтов к аккумуляции радиоактивных веществ, и о зависимости коэффициентов накопления от факторов среды.

Закономерности поглощения и выхода радиоактивных веществ, а также их распределения в морских организмах изучены крайне слабо, и поэтому в настоящее время еще отсутствует возможность подвергнуть их количественному анализу на таком уровне, на каком это можно сделать в отношении коэффициентов накопления радионуклидов. К тому же, изучение коэффициентов накопления представляет собой, по нашему убеждению, то необходимое основание, на базе которого только и возможно прийти к установлению количественных соотношений для процессов обмена радиоактивных веществ между морскими гидробионтами и окружающей средой. Плодотворные исследования в этом направлении начаты Г. В. Бариновым (1964).

Кроме того, коэффициенты накопления, как нам представляется, служат также необходимым элементом при ре-

шении, по крайней мере, таких важных вопросов, как распределение радионуклидов в море, роль пищевых цепей в миграции радиоактивных веществ и дальнейшая судьба радиоизотопов после отмирания гидробионтов.

Коэффициент накопления выражается, как отношение концентраций радионуклида (или соответствующего химического элемента), в организме и водном растворе:

$$K = \frac{C_1}{C_2} \quad (1)$$

где C_1 — концентрация радиоизотопа в гидробионте, C_2 — в водной среде.

Если содержание какого-либо изотопа (элемента) a в объектах 1 и 2 выражено не в абсолютных концентрациях, а по отношению к другому изотопу (элементу) b (обладающему своим коэффициентом накопления K_b , который, как правило, отличается от коэффициента накопления K_a), то частное от деления относительных концентраций изотопа (элемента) в объектах 1 и 2 дает новую важную величину — коэффициент дискриминации D , т. е.

$$D_{a/b} = \frac{C_{a1}}{C_{b1}} : \frac{C_{a2}}{C_{b2}} \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что величины K_a , K_b и D связаны между собой соотношением:

$$D_{a/b} = \frac{C_{a1}}{C_{a2}} : \frac{C_{b1}}{C_{b2}} = \frac{K_a}{K_b}$$

или

$$K_a = K_b D_{a/b}$$

При наличии сведений об относительной концентрации элементов в гидробионтах и водной среде достаточно найти коэффициент накопления соответствующего элемента, чтобы легко рассчитать коэффициенты накопления других элементов.

Если исходить из процентного распределения элемента между гидробионтами и водной средой, то выражение (1) можно переписать, как

$$K = C_1 \frac{1}{C_2} = \frac{P_2 A_1}{P_1 A_2}, \quad (3)$$

где P_1 и P_2 — вес, соответственно, организмов и воды; A_1 и A_2 — активность в организмах и среде в процентах при $A_1 + A_2 = 100\%$. Откуда

$$A_1 = \frac{K}{K+P} 100\%,$$

где

$$P = \frac{P_2}{P_1}.$$

Задачи конкретного исследования определяют выбор выражения коэффициента накопления на сырой (живой) вес, сухой вес или вес зола гидробионта, каждое из которых имеет свой вполне определенный смысл. При расчете коэффициента накопления на золу определяется превышение концентрации элемента в минеральном остатке над его концентрацией, в одном случае, в воде, в другом — в минеральном остатке водного раствора. Цифровые значения и смысловая сторона при этом будут, конечно, различны. Коэффициент накопления на сухой вес указывает на способность органической компоненты к аккумуляции химических элементов из водной среды. В некоторых случаях, когда усадка мала или отсутствует (раковины моллюсков), а коэффициенты накопления очень велики, разница коэффициентов накопления, рассчитанных на сырой и сухой вес, незначительна. Во всех остальных случаях она достаточно велика: до 10 и более раз.

В. И. Вернадский (1929) выражал отношение концентраций радия в растениях и воде в расчете на их живой вес. Он подчеркивал, что концентрация радия в его опытах относится к живому растению, содержащему около 90% воды, и что сухое вещество или зола соответственно более богаты радием, но для выяснения равновесия «радий $\rightleftharpoons$ живые организмы в водной среде» все преимущества, по мнению В. И. Вернадского, имеет избранный им способ обозначения концентрации — на живой вес.

Коэффициенты накопления на основе сырого веса отражают действительную роль живых гидробионтов в концентрировании химических элементов из водных растворов. Более того, расчет доз внутреннего облучения за счет радиации инкорпорированных радиоизотопов возможен только на базе коэффициентов их накопления, приведенных к живому (сырому) весу. Следует отметить, что в литературе, связан-

ной с изучением аккумуляции радионуклидов (элементов) морскими организмами, коэффициенты накопления почти всегда выражаются на сырой вес. Среди исследователей на пресных водоемах многие также основывают коэффициенты накопления на живом весе гидробионтов (А. Н. Марей, М. М. Телитченко и другие). Один из наиболее крупных специалистов по методу меченых атомов в биологии И. Н. Верховская (1955, 1962) совершенно справедливо считает обязательным приводить коэффициенты накопления не к сухому, а к сырому весу организма.

Все величины коэффициентов накопления в нашей работе даны в расчете на сырой (живой) вес, кроме особо оговариваемых случаев.

При внесении радионуклидов в морскую воду в количествах, не изменяющих концентрацию имеющихся в ней изотопных носителей, коэффициент накопления каждого данного радиоизотопа не зависит от его активности (кюри/л) при прочих равных условиях (сохранение всех параметров морской воды, нахождение в одинаковом физическом и химическом состоянии, отсутствие биологического действия и т. п.). Об этом свидетельствует, помимо специальных экспериментов, совпадение величин коэффициентов накопления стабильных элементов в природе, коэффициентов накопления соответствующих им радионуклидов в природных условиях и коэффициентов накопления этих радиоизотопов в опытах.

Небольшие изменения (до двух и даже больше раз) макроколичеств калия и кальция в морской воде не вызывают существенных изменений величин коэффициентов накопления цезия-137 и стронция-90 в морских гидробионтах. Большое постоянство рН морской воды является одним из условий, обеспечивающих стабильность коэффициентов накопления радионуклидов в морских гидробионтах.

Радиоактивные вещества можно подразделить на две группы по их отношению к свету: накапливающиеся в гидробионтах в зависимости от освещения (цезий-137, цинк-65, углерод-14, кобальт-60) и независимо от этого фактора (стронций-90, церий-144, железо-59).

Имеющиеся данные по коэффициентам накопления различных групп химических элементов в морских организмах Тихого и Атлантического океанов, Ирландского, Черного, Баренцева и других морей, за исключением Балтийского моря, вполне согласуются друг с другом, свидетельствуя,

тем самым, об универсальности результатов, полученных на любом море.

Высокими, в общем, коэффициентами накопления в морских растениях порядка сотен и тысяч единиц отличаются радиоизотопы иттрия, церия, празеодима, циркония, ниобия, йода и рутения. В беспозвоночных и рыбах коэффициенты накопления этих изотопов ниже. Резко выделяется высокий коэффициент накопления стронция в стронциевых (целестиновых) спикулах акантарий — 60000, который, к тому же является предельным коэффициентом накопления, так как вычислен для сульфата стронция. Очень много иттрия-90 поглощает пелагическая икра морских рыб — с коэффициентом накопления в ее оболочке до 10000.

Обращает на себя внимание хорошее соответствие цифровых значений коэффициентов накопления, полученных для стабильных и радиоактивных изотопов цезия, стронция и редкоземельных элементов в родственных группах морских организмов в опытных и природных условиях. В водорослях и мягких тканях животных наблюдается практически полное совпадение таких данных. В ракообразных и, особенно, в костях рыб, а также, очевидно, в раковинах моллюсков коэффициенты накопления стронция-90 в эксперименте значительно ниже, чем в природе. Последняя разница, как известно, обусловлена особенностью минерального обмена стронция, состоящей в непрерывном откладывании этого элемента вместе с кальцием в растущих минерализованных тканях. Слабее всего аккумулируется стронций-90 и рутений-106 в теле и мышцах морских животных.

Таким образом, среди морских гидробионтов к наилучшим концентраторам, а также биоиндикаторам осколочных радионуклидов, относятся:

Радионуклид

Цезий-137

Стронций-90

Радиоизотопы иттрия

Гидробионты

Бурые и красные водоросли, мягкие ткани беспозвоночных и рыб. Лучевики, особенно, их спикулы; из зеленых водорослей *Carteria* sp.; все виды бурых водорослей; кокколиты *Coccolithophoridae*; панцири ракообразных, раковины моллюсков и кости рыб.

Оболочка пелагической икры рыб, водоросли, ракообразные, раковины моллюсков.

Церий-144

Цирконий-95

Ниобий-95

Германий-71

Йод-131

Рутений-106

Водоросли, актинии, ракообразные, тело моллюсков и икра рыб.

Водоросли и моллюски.

Водоросли, ракообразные и моллюски.

Морские цветковые растения.

Водоросли

Водоросли и ракообразные.

Большими коэффициентами накопления в общем отличаются золото, цинк, фосфор, марганец, железо, кобальт и, по-видимому, хром, а ничтожными — сера.

Анализ роли пищевых цепей в море при наличии радиоактивности в воде приводит к выводу об их второстепенном значении в накоплении гидробионтами радиоактивных веществ. Такая закономерность в водоемах прямо противоположна закономерности биологической миграции радиоактивных веществ на суше. Основной путь поступления радионуклидов в водные организмы — прямое поглощение из водной среды. Совершенно другой вопрос о передаче радиоактивных веществ по пищевым связям гидробионтов, мигрировавших в «чистые» акватории, специально еще не исследовался, по-видимому, в силу своей чрезвычайной сложности и трудоемкости.

После отмирания бурых водорослей наблюдается выход избытка стронция-90 в морскую воду. Важно изучить распространенность такого явления в миграции этого важнейшего радионуклида в водоемах. Цезий-137 и радиоизотопы редкоземельных элементов не только удерживаются, но и дополнительно сорбируются детритом, по крайней мере, в ближайшие месяцы после его образования.

При нормальных и даже необычно высоких биомассах планктона в морях на долю последнего в каждый данный момент времени приходится лишь ничтожная, пренебрежимо малая часть радиоактивных веществ, попавших в морскую воду. Например, для извлечения всего 1% радионуклида при его коэффициенте накопления 1000 единиц требуется биомасса в 10 г/м^3 , а для 50% при том же коэффициенте накопления — 1000 г/м^3 . Однако, в связи с краткостью жизни планктонных организмов, быстротой воспроизводства и миграциями они действуют подобно насосу, который может с небольшой скоростью, но непрерывно перекачивать целый ряд радионуклидов из одних слоев моря в другие. При определенных условиях биологический перенос

радиоактивных веществ в морях преобладает над физическим перемещением. Так, при коэффициентах накопления 100—1000 в планктоне и коэффициентах перемешивания воды 10^{-1} — 10^{-2} отношение биологического переноса к физическому в море составляет 10—100.

Таким образом, проблема влияния гидробионтов на радиоактивную среду вырисовывается, в общем, в виде довольно цельной картины. Во всяком случае, на ней обнаруживаются основные закономерности и характеристики этого процесса, и, кроме того, что очень важно, могут быть установлены достаточно точно необходимые вопросы, подлежащие первоочередному изучению.

* * *

Вопросы радиочувствительности водных, особенно, морских организмов разработаны очень слабо. Обобщениями имевшегося небольшого материала по действию внешнего облучения на гидробионты явились наши обзорные статьи (В. И. Корогодин, Г. Г. Поликарпов, 1957; Г. Г. Поликарпов, 1960) и работа Л. Доналдсона и Р. Фостера (L. Donaldson, R. Foster, 1957). Сводные данные, включая результаты собственных исследований по влиянию радиоактивных растворов (инкорпорированных радиоактивных нуклидов) на морские организмы, опубликованы нами (Г. Г. Поликарпов, 1960, 1964). Важнейший вопрос о действии радиоактивных веществ на развивающуюся икру морских рыб выпадал из поля зрения исследователей. С 1960 г. такие работы были начаты и проводятся с тех пор постоянно в нашей лаборатории (Г. Г. Поликарпов, В. Н. Иванов, 1961, 1962; Г. Г. Поликарпов, 1964).

В четвертом разделе представлены сведения по радиочувствительности гидробионтов как в отношении внешнего, так и внутреннего облучения. При рассмотрении закономерностей биологического действия ионизирующих излучений в растворах радиоактивных веществ нами был выявлен радиобиологический смысл понятия коэффициента накопления и введен ряд необходимых соотношений. Тем самым, исследования двух сторон процесса взаимодействия между радиоактивной средой и живыми организмами — накопление и действие радионуклидов — сливаются, на наш взгляд, вполне логично, в единую проблематику морской радиоэкологии.

Наконец, нами предпринята попытка обсудить вопросы радиационной опасности радиоактивного загрязнения морских вод для жизни моря и его биологической продуктивности.

Если в радиоактивном растворе некоторого объема, гораздо большего, чем пробег бета-частиц, находятся микроскопические организмы или мелкая пелагическая икра рыб, то переход от активности радионуклида к поглощенной дозе в растворе и, следовательно, в микрообъектах представляет весьма значительный интерес.

Очевидно, что поглощенная энергия равна $N\bar{E}\rho$, где N — скорость распада в расп/сек., $\bar{E}$ — средняя энергия ($\bar{E} = 0,38 E_{\text{макс.}}$) в Мэв, ρ — число частиц на 1 распад.

Отсюда получаем выражение для поглощенной дозы:

$$D = \frac{1,6 \cdot 10^{-6} \rho N \bar{E}}{100} \text{ рад/сек.}$$

или

$$D = 1,95 \cdot 10^4 \rho E_{\text{макс.}} C \cdot \text{ОБЭ рад/сутки,}$$

где C — кюри/л.

Радиобиологический смысл коэффициента накопления можно выразить отношением доз, создаваемых излучениями одного и того же радионуклида в организме (органе) D_1 и водной среде D_2 :

$$K = \frac{D_1}{D_2}.$$

Иными словами, пользуясь коэффициентом накопления, представляется возможным в общем случае перейти от доз в среде к дозам в организме (органе) и обратно:

$$D_1 = K D_2$$

В частных случаях ограничения в применении этого соотношения налагаются размерами, точнее величиной поперечного сечения гидробионта или его органа, которая должна быть соразмерна (равна или более) с длиной пробега частиц, а также, в ряде случаев, плотностью гидробионта, если таковая заметно отличается от плотности воды.

Бета-частицы иттрия-90 расходуют свою энергию в слое ткани, толщиной около 4 мм — на 100%, около 0,4 мм —

10% и около 0,04 мм — на 1%. Таким образом, для микро-организмов основную роль может играть не внутреннее, а внешнее облучение из радиоактивного раствора. С другой стороны, макроорганизмы, особенно бентосные растения, становятся источниками повышенного внешнего облучения для взрослых гидробионтов или их развивающихся стадий, например, бентосной икры рыб, составляющих тот или иной микробиоценоз. В первую очередь это относится к радионуклидам, которые адсорбируются на поверхностях, вследствие чего вокруг макроорганизмов образуется близлежащий «горячий» слой толщиной для бета-излучения до нескольких миллиметров. На такую же глубину этот слой простирается внутрь гидробионта.

Предвидение размеров опасности радиоактивного загрязнения морей и океанов для гидробионтов — одна из важнейших задач науки века ядерной энергии. Очевидно, что для человека далеко не безразлично то, что может произойти с морскими пищевыми ресурсами. Уже теперь совершенно ясно, что в ближайшем будущем человечество будет более интенсивно использовать морскую и океаническую «целину», как источник громадного количества питательных веществ. Поэтому вопрос о биологической продуктивности морей входит составной частью в общую экономическую проблему.

Если сопоставить данные по предельно допустимым концентрациям радионуклидов в морской воде и морских пищевых организмах, то можно прийти к следующим выводам. Относительно предельно допустимых концентраций радиоактивных веществ (для человека) в морской воде имеется весьма значительное разногласие в различных документах. Для стронция-90 отличия составляют около четырех порядков величин. Значительная разница наблюдается и в отношении других радионуклидов: для хрома-51, цинка-65, ниобия-95 и рутения-106 — на два, цезия-137 — на три, йода-131 — на четыре порядка величин.

По данным Д. Притчарда (D. Pritchard, 1960), предельно допустимой концентрацией стронция-90 в морской воде является 10^{-12} кюри/л. В настоящее время эта концентрация по стронцию-90 достигнута в Тихом океане и Ирландском море. В северной и средней части Тихого океана и в Ирландском море она доходила даже до 10^{-11} кюри/л в 1954, 1956, 1959 и 1960 гг.

Как показано нами, наиболее чувствительной к воздействию низких концентраций стронция-90 — иттрия-90 в пределах 10^{-12} — 10^{-10} кюри/л (и выше) оказалась икра морских рыб. Отсюда следует, что концентрация стронция-90 10^{-12} кюри/л является критической не только для человека, но и для морских рыб на ранних стадиях их развития. При этом важно иметь в виду, что значительная масса икры морских рыб относится к пелагическому типу и сосредоточена в основном у самой поверхности морской воды, входя в гипонейстон. Поэтому в общем комплексе морских радиоэкологических исследований, посвященных изучению закономерностей взаимодействия между радиоактивной средой и морскими организмами (Г. Г. Поликарпов, 1960—1964), следует отвести особое место радиоэкологии обитателей приповерхностного слоя гидросферы — гипонейстона (Ю. П. Зайцев, 1960—1962).

По нашим данным, доля личинок рыб с лучевыми аномалиями возрастает примерно пропорционально логарифму активности стронция-90 — иттрия-90 в растворе, начиная с 10^{-10} кюри/л ($P < 0,05$). Тенденция к увеличению частоты появления уродливых личинок рыб отмечается даже при 10^{-12} кюри/л.

Очевидно, что в этих исследованиях могли учитываться только отчетливые морфологические уродства, т. е. далеко не все аномалии личинок рыб, особенно такие, как анатомические, физиологические, биохимические, генетические. Выяснение и количественная оценка всех видов лучевого поражения эмбрионов и личинок рыб, а также проявления радиационного последствия в процессе перехода рыб во взрослое состояние, — важнейшая задача радиоэкологии ближайшего будущего.

В общем виде можно представить себе следующую картину далеко идущих последствий изменения гипонейстона под действием лучевого фактора: с одной стороны, угнетение и вырождение целого ряда промысловых рыб и других радиочувствительных организмов, а с другой стороны, — бурное развитие и вспышку бактерий, микрофитов и радиорезистентных форм беспозвоночных.

Гораздо труднее предвидеть конкретные формы и количественную сторону таких последствий, особенно, в связи с тем, что, во-первых, мы еще не знаем с уверенностью величин «предельно допустимых» концентраций радионуклидов в морской воде для нормальной жизнедеятельности и вос-

производства морских организмов, в первую очередь, рыб, в природных условиях и, во-вторых, еще отсутствуют данные о спектре лучевого поражения рыб, т. е. о количественном соотношении между отмирающей икрой, погибающими личинками и мальками, выживающими до взрослого состояния рыбами (стерильными и способными к размножению), а также о характере и темпах радиогенетического вырождения морских рыб.

Однако, приведенный материал свидетельствует, с одной стороны, об исключительно высокой радиочувствительности развивающейся икры морских рыб, а с другой, — о крайней близости концентраций стронция-90 — иттрия-90, вызывающих увеличение частоты появления уродливых личинок рыб, и концентраций тех же радионуклидов в Тихом океане и Ирландском море. Это последнее обстоятельство, сигнализирующее о возможной критичности положения в гидросфере, заставляет сделать первый шаг на пути выяснения вероятных последствий лучевого поражения гипонейстона.

Само собой разумеется, что необходимым условием сокращения рыбных запасов (при прочих равных условиях) является наличие хронически действующего поражающего фактора, распределенного по всему морю или большим акваториям океана, т. е. практически по всей гидросфере. Этим требованиям отвечают глобальные радиоактивные загрязнения.

Совместно с Ю. П. Зайцевым нами (Ю. П. Зайцев, Г. Г. Поликарпов, 1964) произведен расчет периода сокращения запасов рыб наполовину в годах (Т) для некоторых видов черноморских рыб в зависимости от доли икры в гипонейстоне, подвергшейся лучевому поражению (от 5 до 100%).

Ю. П. Зайцев полагает, что при сокращении запасов морских рыб в два и более раза рыбный промысел очень резко упадет, а во многих случаях прекратится. С промысловой точки зрения, по-видимому, допустимо лучевое поражение не более 10% икры в слое гипонейстона, хотя уловы рыб при этом заметно уменьшатся (Т от 30 до 50 лет).

Изменения в содержании радиоактивных веществ в морской воде должны повлечь за собой и изменения доли пораженной гипонейстонной икры. Иначе говоря, на обычные колебания численности рыб определенным грузом и асинхронно могут накладываться колебания запасов рыб, опре-

деляемые меняющимся по интенсивности радиоэкологическим фактором.

Из сказанного следует, что гипонейстон не только самый обширный по площади, но и, весьма вероятно, самый чувствительный биоценоз на земном шаре к действию радиоактивных загрязнений.

«Средние» концентрации радионуклидов в морской воде явно недостаточны для оценки биологических последствий их действия. При какой-то «средней» концентрации радиоактивных веществ в толще моря может быть (в зависимости от источника радиоактивного загрязнения) совершенно иная ситуация в гипонейстоне и бентосе, при которой действительные концентрации превышают эту «среднюю» концентрацию на много порядков величин. Следует, кроме того, подчеркнуть, что существующие величины предельно допустимых концентраций радионуклидов в морской воде рассчитаны для перехода в организм человека. Исследования же по установлению предельно допустимых концентраций для самих морских организмов еще только начинаются (Г. Г. Поликарпов, В. Н. Иванов, 1961, 1962). Форсирование таких работ — насущная необходимость, возникающая перед радиоэкологами в настоящее время.

Таким образом, хотя изучение действия радиоактивных веществ на морские организмы, их популяции и биоценозы фактически находится на первом этапе, уже теперь представляется возможным сделать тот важный научно обоснованный вывод, что **дальнейшее радиоактивное загрязнение вод морей и океанов является недопустимым.**

* * *

Значение морских радиоэкологических исследований в будущем, несомненно, будет все более и более возрастать. Действительно, радиоэкология — составная часть века атомной энергии. При этом развитие всех ее частей должно не следовать за прогрессом в производстве и использовании данного вида энергии, а опережать его, ибо только в таком случае радиоэкология сможет выполнять стоящие перед ней задачи — создание научных основ для составления соответствующих прогнозов и рекомендаций. Здесь имеются в виду все источники радиоактивного загрязнения биосферы в целом и отдельных ее участков. Особое место, очевидно, должно отводиться предвидению последствий радиоактивного заражения биосферы в случае ракетно-ядерной войны.

Поэтому необходимо в возможно краткий срок располагать как можно большей информацией о реальных и потенциальных биологических изменениях в биосфере в результате выхода радиоактивных веществ из-под разумного контроля человека. От быстроты получения выводов и их правильности зависит очень многое или даже все: в отношении безопасности для жизни на земле можно ошибиться только один раз. Дезактивации от радиоактивных веществ поддаются лишь небольшие участки, но не биосфера в целом. Насытить защитными веществами органический мир также невозможно. Учащение мутационного процесса и образования злокачественных опухолей, перестройка сложившихся биоценозов и нарушение вековых биогеохимических циклов могут быть необратимыми в первую очередь для высокоорганизованных существ, являющихся, вместе с тем, как известно, наиболее радиочувствительными.

Положение с радиационной опасностью для жизни в море усугубляется тем обстоятельством, что морские организмы на протяжении геологической истории получали гораздо меньшие дозы ионизирующих излучений от космических лучей и естественно-радиоактивных веществ, чем сухопутные. Не исключено поэтому, что в результате воздействия дополнительными дозами излучений эволюционный процесс обитателей моря может подвергнуться изменению. Весьма существенно учитывать, что онтогенез многих морских форм начинается со свободной, ничем не защищенной яйцеклетки, способной легко сорбировать значительные количества многих радионуклидов.

Изложенный в настоящей работе материал показывает, что морской радиоэкологией сделан лишь первый шаг. Образуя говоря, впереди — целое море, целый океан работы, которую нужно выполнять быстрыми темпами.

* * *

Анализ полученного материала по морской радиоэкологии позволяет прийти к следующим общим основным выводам.

1. Вслед за появлением в гидросфере нового фактора среды, необычайно эффективного в биологическом отношении — ионизирующих излучений искусственно-радиоактивных веществ, возникла необходимость в проведении исследований по действию радионуклидов на морские гидробионты и выяснению роли последних в миграции радиоизото-

пов в морях и океанах. Эти задачи и предмет входят в компетенцию морской радиоэкологии, являющейся частью радиоэкологии или экологической радиобиологии.

2. Морская радиоэкология призвана изучать закономерности взаимодействия между радиоактивной средой и морскими организмами, и, следовательно, разрабатывать научные основы для предвидения характера, уровней и темпа радиоактивного загрязнения морских организмов и степени опасности различных концентраций радиоактивных веществ в морской воде для жизни моря, его биологической и промысловой продуктивности, а также для мероприятий по предотвращению радиационных воздействий.

3. Мерой концентрирующей способности гидробионтов служит коэффициент накопления, который определяется как отношение концентраций радиоизотопа (химического элемента) в организме (живой вес) и водной среде. При прочих равных условиях коэффициенты накопления радионуклида не зависят от уровней его радиоактивности в воде (в особенности, если не нарушается концентрация соответствующего стабильного носителя, радиоактивные и стабильные изотопы одного и того же элемента находятся в одинаковой химической форме, и между ними осуществляется изотопный обмен, отсутствует лучевое поражение у гидробионтов и т. д.) и остаются постоянными в одних и тех же или родственных видах из различных морей (кроме опресненного Балтийского моря) для каждого радионуклида (элемента). Постоянство рН морской воды способствует стабильности коэффициентов накопления. К числу факторов, оказывающих влияние на процесс накопления, относятся физическое и химическое состояние радиоактивных веществ в растворе, температура воды, освещенность и некоторые другие.

4. Почти для каждого радиоизотопа (химического элемента) существует несколько видов гидробионтов — своеобразных биоконцентраторов (биоиндикаторов). По большинству величин коэффициентов накопления в морских организмах все радиоактивные вещества можно подразделить на группы: с очень высокими коэффициентами накопления — десятки тысяч, высокими — сотни и тысячи, средними — десятки, малыми — единицы и очень малыми — менее единицы. В свою очередь разные группы морских организмов отличаются различной способностью аккумулировать тот или иной радиоизотоп. Специфическими накопителями це-

зия-137 являются бурые и красные водоросли, мягкие ткани беспозвоночных и рыб; стронция-90 — лучевики (особенно их спикулы), из зеленых водорослей — *Carteria* sp., все виды бурых водорослей, минерализованные ткани морских животных; радиоизотопов иттрия — пелагическая икра рыб, водоросли, ракообразные и раковины моллюсков; церия-144 — водоросли, актинии, ракообразные, тело моллюсков и икра рыб; циркония-95 — водоросли и моллюски; ниобия-95 — водоросли, ракообразные и моллюски; германия-71 — морские цветковые растения; йода-131 — водоросли и рутения-106 — водоросли и ракообразные.

5. На суше, как известно, важнейшим каналом поступления радиоактивных веществ в наземные организмы служат пищевые связи. В противоположность этому в водной среде при наличии в ней радионуклидов основным путем аккумуляции последних гидробионтами является прямое поглощение из воды. Передача радиоактивных веществ по пищевым цепям в водоемах может приобретать значение лишь при отсутствии этих веществ в эдафической среде, т. е., например, после миграции радиоактивных водных организмов в «чистые» акватории.

6. В каждый момент времени доля радиоактивных веществ в море, приходящаяся на гидробионты при нормальных и даже высоких биомассах, крайне ничтожна. Предельно большая биомасса океанического планктона (10 г/м^3) может извлечь из водной среды всего лишь 1% радионуклида (при коэффициенте накопления 1000). Однако, благодаря быстрой непрерывной смене поколений, интенсивному воспроизводству и миграциям, планктонные организмы действуют, как своего рода насос, постоянно перекачивающий многие радиоактивные вещества в более глубокие слои или на дно моря. При коэффициенте накопления радионуклида 1000 и коэффициенте перемешивания 0,1 биологический перенос радиоактивности по вертикали вниз превосходит гидрологический в 10 раз.

7. В процессе детритообразования, в противоположность радиоизотомам редкоземельных элементов и, по-видимому, другим нуклидам, избыток стронция-90, накопленного при жизни, возвращается из отмирающих морских растений в окружающую среду. Следовательно, стронций-90 не только наиболее опасен в пище по сравнению с другими радиоизотопами для человека, но и наиболее мобилен в

море, оставаясь долгое время в морской воде и загрязняя все новые и новые организмы.

8. Лучевое поражение гидробионтов протекает по общим радиобиологическим закономерностям, независимо от систематического положения (от одноклеточных до позвоночных включительно).

9. Среди морских организмов рыбы оказались наиболее радиочувствительными формами, а наиболее радиорезистентными — водоросли. Промежуточное положение занимают водные беспозвоночные. Исключительно чувствительна развивающаяся икра рыб как к воздействию внешнего облучения, так и к излучениям инкорпорированных радиоизотопов. На ранние этапы развития икры рыб оказывает повреждающее действие внешнее облучение в дозе около 16 р. Увеличение частоты появления уродств у личинок морских рыб обнаружено, начиная с диапазона концентраций 10^{-12} — 10^{-10} кюри/л по стронцию-90 — иттрию-90, т. е. при уровнях, которые уже достигнуты в Тихом океане и Ирландском море.

10. Существующие в литературе данные о величинах предельно допустимых концентраций различных радиоактивных веществ в морской воде для человека, питающегося радиоактивными морскими организмами, весьма различны, отличаясь для одного и того же радионуклида от 100 до 10000 раз. Так, предложенные предельно допустимые концентрации стронция-90 в морской воде варьируют от 10^{-12} до 10^{-8} кюри/л. Предельно допустимые концентрации радиоактивных веществ в морской воде для самих гидробионтов и их сообществ пока почти полностью отсутствуют. Как уже отмечалось, по нашим данным, для развивающейся икры морских рыб такая концентрация, учитывая коэффициент запаса, по-видимому, меньше или около 10^{-12} — 10^{-10} кюри/л по стронцию-90.

11. Наибольшее сосредоточение жизни, в том числе пелагической икры морских рыб, в приповерхностном слое океана (от 0 до 5 см глубиной) — гипонейстоне — обуславливает его особую подверженность вредному действию радиоактивных осадков из атмосферы, которые могут создавать в нем высокие уровни радиоактивности. Поражение гипонейстона радиоактивными веществами грозит, в первую очередь, подрывом воспроизводства запасов морских и океанических промысловых рыб.

12. Сравнительная опасность стронция-90, цезия-137 и радиоизотопов редкоземельных элементов различна для человека, питающегося «дарами моря», и для самих морских гидробионтов в связи с различными путями поступления этих нуклидов и, в конечном счете, различными поглощенными тканевыми дозами облучения. При равных концентрациях в морской воде и с учетом коэффициентов накопления для человека наиболее опасен стронций-90, а для гидробионтов — радиоизотопы редкоземельных элементов.

13. Приведенный материал по морской радиоэкологии свидетельствует о недопустимости дальнейшего радиоактивного загрязнения морей и океанов в связи с большим риском вызвать необратимые изменения в гидробиосфере, подорвать ее промысловые ресурсы и загрязнить до опасных уровней морские организмы, употребляемые человеком в пищу. Для предотвращения таких радиационных последствий необходимо не допускать продолжения испытаний ядерного оружия и прекратить сбросы жидких и твердых радиоактивных отходов ядерных производств в моря и океаны.

14. Век атомной энергии требует быстрого и всестороннего развития морских радиоэкологических исследований, так как имеющихся в настоящее время данных крайне недостаточно для создания научно обоснованных рекомендаций и разработки мероприятий по предотвращению и ликвидации локальной радиационной опасности, которая в различных формах может возникать при эксплуатации атомных кораблей, береговых ядерных реакторов, а также осуществления крупных научных экспериментов в море с применением радиоактивных изотопов. Особую задачу в условиях не устраненной опасности ракетно-ядерной войны составляет предвидение радиоэкологических последствий в гидробиосфере в случае военного применения ядерного оружия.

Таким образом, морская радиоэкология, как детище ядерной эры, принимает непосредственное участие в благородном деле по обеспечению радиационной безопасности гидробиосферы.

* * *

Работы автора, использованные в диссертации, опубликованы в следующих изданиях:

Г. Г. Поликарпов. 1957. К вопросу о развитии реакций радиационного последствия. Биофизика, т. 2, № 2.

- Г. Г. Поликарпов. 1957. Об особенностях реакций радиационного последствия у *Pelmatohydra oligactis*. «Биохимические и физико-химические основы действия радиаций» (тез. докл.). Изд. МГУ, М.
- Г. Г. Поликарпов. 1958. Накопление радиоизотопа цезия пресноводными моллюсками. «Природа», № 5.
- Г. Г. Поликарпов. 1960. Радиоактивные изотопы и ионизирующие излучения в морской биологии. Тр. Севастоп. биол. ст., т. XIII.
- Г. Г. Поликарпов. 1960. Поглощение радиоактивности морскими организмами. «Природа», № 1.
- Г. Г. Поликарпов. 1960. О накоплении осколочных радиоизотопов морскими организмами. I. Аккумуляция бентосными растениями и животными стронция-90, иттрия-91 и цезия-144. Научн. докл. высш. школы, биол. науки, № 3.
- Г. Г. Поликарпов. 1960. К изучению фосфорного питания *Ulva rigida* методом меченых атомов. Тр. Севастоп. биол. ст., т. XIII.
- Г. Г. Поликарпов. 1960. О способности морской водоросли *Ulva rigida* накапливать уран-238 из его равновесной смеси с торием-234. Тр. Севастоп. биол. ст., т. XIII.
- Г. Г. Поликарпов. 1960. О роли морского бентоса в миграции сульфатов и сульфидов. Научн. докл. высш. школы, биол. науки, № 4.
- Г. Г. Поликарпов. 1961. Материалы по коэффициентам накопления ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{144}Ce в морских организмах. Тр. Севастоп. биол. ст., т. XIV.
- Г. Г. Поликарпов. 1961. О накоплении осколочных радиоизотопов морскими организмами. II. Аккумуляция водорослями, актиниями и мидиями германия-71 и цезия-137 и цветковыми растениями германия-71, стронция-90, иттрия-91, цезия-137 и цезия-144. Научн. докл. высш. школы, биол. науки, № 4.
- Г. Г. Поликарпов. 1961. О стабильности коэффициентов накопления стронция-90, иттрия-91 и цезия-144 в морских водорослях. Докл. Акад. наук СССР, т. 140, № 5.
- Г. Г. Поликарпов. 1961. Поглощение стронция-90 морскими организмами. «Природа», № 2.
- Г. Г. Поликарпов. 1961. Роль детритообразования в миграции стронция-90, цезия-137 и цезия-144. Опыты с морской водорослью *Cystoseira barbata*. Докл. Акад. наук СССР, т. 136, № 4.
- Г. Г. Поликарпов. (G. G. Polikarpov). 1961. Ability of some Black Sea organisms to accumulate fission products. Science, v. 133, N 3459.
- Г. Г. Поликарпов. 1964. Некоторые биологические аспекты радиоактивного загрязнения морей и океанов. Сб. «Радиоактивная загрязненность морей и океанов». Изд. «Наука», М.
- Г. Г. Поликарпов. 1964. Радиоэкология морских организмов. Госатомиздат, М. (в печати).
- Совместные работы автора с сотрудниками отделов радиобиологии, планктона и биогеографии ИнБЮМ АН УССР.
- А. Д. Акамсин, В. П. Парчевский, Г. Г. Поликарпов. 1960. Радиоактивность некоторых представителей черноморского планктона, бентоса и нектона. Тр. Севастоп. биол. ст., т. XIII.

- А. Д. Акамсин, В. П. Парчевский, Г. Г. Поликарпов. 1960. Водоросль накапливает радиоактивность. «Природа», № 2.
- Г. Г. Поликарпов, А. Д. Акамсин. 1960. Экспериментальное изучение накопления иттрия морскими водорослями, актиниями и грибами. Тр. Севастоп. биол. ст., т. XIII.
- Г. Г. Поликарпов, В. Н. Иванов. 1961. О действии Sr^{90} и Y^{90} на развивающуюся икру хамсы. Вопросы ихтиологии, т. I, вып. 3(20).
- Г. Г. Поликарпов, Л. А. Ланская. 1961. Размножение массовой одноклеточной водоросли *Prorocentrum micans* в присутствии серы-35. Тр. Севастоп. биол. ст., т. XIV.
- Г. Г. Поликарпов, В. П. Парчевский. 1961. Радиоактивность водорослей Адриатического и Черного морей. «Океанология», № 2.
- Г. Г. Поликарпов, В. С. Тен. 1961. Изучение кинетических закономерностей накопления UI и UX, представителями зеленых, бурых и красных водорослей. Научн. докл. высш. школы, биол. науки, № 2.
- Г. Г. Поликарпов, В. Н. Иванов. 1962. Повреждающее действие стронция-90 — иттрия-90 на ранний период развития барабули, зеленушки, ставриды и хамсы. ДАН СССР, т. 144, № 1.
- Г. Г. Поликарпов, В. Н. Иванов. 1962. Накопление радионуклидов стронция и иттрия икрой морских рыб. «Радиобиология», т. 2, вып. 2.
- Г. Г. Поликарпов, В. Н. Иванов. 1962. Действие стронция-90 — иттрия-90 на развивающуюся икру хамсы и каменного окуня. Бюлл. МОИП, отд. биол. т. 67, № 3.
- Г. Г. Поликарпов, В. С. Тен. 1962. Кинетические закономерности выхода стронция-90 из *Cystoseira barbata* Good. et Wood. Научн. докл. высш. школы, биол. науки, № 4.
- В. П. Парчевский, Г. Г. Поликарпов, И. С. Забуруннова. 1964. Некоторые закономерности накопления иттрия и стронция морскими организмами. Докл. АН СССР (в печати).
- Ю. П. Зайцев, Г. Г. Поликарпов. 1964. Вопросы радиоэкологии гипонейстона. «Океанология», № 3 (в печати).
Совместные работы автора с сотрудниками других учреждений.
- В. Н. Беневоленский, В. И. Корогодин, Г. Г. Поликарпов. 1957. Биофизические основы действия ионизирующих излучений. В кн.: «Радиобиология» (Биологическое действие ионизирующих излучений), сер. Итоги науки, биол. науки, I. Под ред. А. М. Кузина. Изд. АН СССР, М.
- И. Н. Бируков, В. И. Корогодин, Г. Г. Поликарпов. 1957. Динамика яркости люминесценции как показатель радиационного поражения. «Биохимические и физико-химические основы действия радиаций» (тез. докл.). Изд. МГУ, М.
- В. И. Корогодин, Г. Г. Поликарпов. 1957. Первичные процессы при лучевом поражении (к вопросу о механизме усиления радиобиологического эффекта). Усп. совр. биол., т. 54, вып. 1(4).
- И. Н. Бируков, В. И. Корогодин, Г. Г. Поликарпов. 1958. Новое в применении люминесцентной микроскопии для изучения биологического действия ионизирующих излучений. Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., т. 3, вып. 2.
- В. И. Корогодин, Г. Г. Поликарпов. 1958. Биологическое действие ионизирующих излучений, процессы старения и продолжительность жизни. Мед. радиология, № 4.
- Е. А. Тимофеева-Ресовская, Э. И. Попова, Г. Г. Поликарпов. 1958. О накоплении пресноводными организмами химических элементов из водных растворов. I. Концентрация радиоактивных изотопов фосфора, цинка, стронция, рутения, цезия и церия разными видами пресноводных моллюсков. Бюлл. МОИП, отд. биол., т. 63 № 1.
- А. Б. Гецова, Н. А. Ляпунова, Г. Г. Поликарпов, Е. А. Тимофеева-Ресовская. 1964. О накоплении пресноводными организмами химических элементов из водных растворов. VI. О накоплении и распределении по органам радиоактивных изотопов восьми различных элементов беззубой *Anodonta cellensis*. Бюлл. МОИП, отд. биол. (в печати).