

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР

ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Ордена Трудового Красного Знамени

Институт прикладной геофизики

На правах рукописи

✓ ПЕТРОВ АНАТОЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И МИГРАЦИЯ ДОЛГОЖИВУЩИХ  
ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В МОРСКИХ  
ЭКОСИСТЕМАХ

Специальность 01.04.12 - геофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

М О С К В А - 1 9 7 9



Работа выполнена в лаборатории радиационной и химической экологии Всесоюзного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО).

Научные руководители: доктор физико-математических наук  
ПРЕССМАН А.Я.  
доктор биологических наук  
ПАТИН С.А.

Официальные оппоненты: доктор химических наук  
РОВИНСКИЙ Ф.Я.  
кандидат физико-математических наук  
ГЕДЕОНОВ Л.И.

Ведущее предприятие: Институт экспериментальной  
метеорологии (г.Оонинск)

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1979 г.

Защита диссертации состоится в ордена Трудового Красного Знамени Институте прикладной геофизики (ИПГ) на заседании специализированного совета К-024.09.02

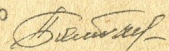
в " \_\_\_\_ " час. " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1979 г.

(по адресу: 107258, Москва, Б-258, Глебовская ул., 206, ИПГ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПГ.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направить в адрес ИПГ.

Ученый секретарь  
специализированного  
совета

 Л.И. Болтнева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Радиоактивное загрязнение как новый экологический фактор в окружающей среде по-прежнему остается предметом всесторонних исследований в нашей стране и за рубежом. Это связано с продолжающимся выпадением продуктов ядерных взрывов из атмосферы, поступлением радиоактивных отходов в естественные водоемы и другими источниками радиоактивного загрязнения, сопряженными с использованием атомной энергии в мирных целях. Особую остроту в этой проблеме приобретают исследования радиоактивного загрязнения водной среды и прежде всего Мирового океана, куда поступают в конечном счете радиоактивные продукты различного состава и происхождения.

Одно из важных и до сих пор слабо разработанных направлений исследования загрязнения Мирового океана состоит в изучении распределения и миграции искусственных радионуклидов и их потоков в морской экосистеме. От успехов в этой области зависит в известной мере эффективность широких и дорогостоящих мероприятий по предотвращению загрязнения морских регионов. Без балансовых оценок и расчетов скоростей поступления, миграции и выведения токсических примесей из экосистемы водоема невозможно обосновать такие практически важные параметры как предельно допустимые нагрузки загрязняющих веществ для того или иного региона, прогностические оценки самоочищающей способности водоема и другие. Решение этих же задач применительно к гипотетической ситуации интенсивного радиоактивного загрязнения в чрезвычайных условиях позволит прогнозировать радиоэкологическую ситуацию в Мировом океане и дать ответ на вопрос о том, в какой мере можно рассчитывать на морепродук-



ты, как на один из основных источников пищевых ресурсов.

Цель и задачи. Цель работы — развитие математических методов моделирования поведения искусственных радионуклидов в морских экосистемах и иллюстрация возможностей подобных методов для описания сложившейся картины радиоактивного загрязнения и прогнозирования возможных радиоэкологических ситуаций на морских регионах.

Основные задачи работы: а) на основе оригинальных и литературных данных выявить характерные черты картины современного загрязнения воды и гидробионтов Мирового океана долгоживущими радионуклидами; б) построить математическую модель расчета уровней радиоактивного загрязнения в условиях глобальных выпадений; в) изучить возможность применения теории графов (потoki в сложных сетях) для описания потоков миграции и баланса радионуклидов в водных экосистемах; г) на основе разработанных математических моделей и подходов прогнозировать уровни и характер радиоактивного загрязнения в некоторых водоемах; д) выявить статистически достоверные уровни современного радиоактивного загрязнения промышленной ихтиофауны Мирового океана и оценить фактический материал с радиационно-гигиенической точки зрения.

Теоретическая значимость и научная новизна. В диссертации подведены итоги комплексных радиоэкологических исследований, проведенных с участием автора во ВНИРО с 1971 г. по настоящее время.

Подобных обобщающих работ, использующих комплексный подход к изучению радиоактивного загрязнения Мирового океана, очень мало. Материалы настоящей работы дают не только характеристику поля радиоактивного загрязнения вод Мирового океана, но и позволяют прогнозировать радиоэкологическую обстановку

в различных ситуациях. Разработанный на основе теории графов оригинальный математический подход является универсальным при изучении миграции радионуклидов в различных водных экосистемах. В отличие от существующих довольно сложных математических моделей предложена простая и удобная модель расчета уровней глобального радиоактивного загрязнения различных регионов Мирового океана.

На основе многочисленных анализов (более 10 тыс.) определены статистически достоверные уровни загрязнения промышленных рыб стронцием-90 и цезием-137, а также оценены обобщенные коэффициенты накопления этих радионуклидов для всей ихтиофауны.

Полученные в диссертации общие выводы, положения и разработанный математический подход могут быть использованы при изучении распределения и миграции загрязняющих веществ химической природы, в т.ч. тяжелых и переходных металлов хлорорганических токсикантов и др.

Практическая ценность. Результаты и выводы диссертации могут быть использованы при решении ряда вопросов, связанных с удалением в океан радиоактивных отходов или при нормировании их сброса в реки и моря. Разработанные математические модели применимы для оценки и прогноза радиоактивного загрязнения водных экосистем в современных условиях и в различных ситуациях радиоэкологического характера. Обобщенные на большом фактическом материале уровни загрязнения воды, гидробионтов и характерные коэффициенты накопления радионуклидов представляют определенный интерес при оценке радиационной чистоты рыбохозяйственных водоемов и рыбопродукции с радиационно-гигиенических позиций.



Реализация работы. Сделанные в работе обобщения фактического материала и установление характерных глобальных и региональных уровней радиоактивного загрязнения морской среды и промысловой ихтиофауны позволили значительно сократить объем трудоемких радиохимических и гамма-спектрометрических анализов, проводимых в системе постоянного радиозэкологического контроля Минрыбхоза СССР. Основные выводы и положения диссертации были использованы также при планировании и ориентации радиозэкологических исследований в морских рыбохозяйственных научно-исследовательских институтах. Отработанные в ходе выполнения массовых анализов некоторые методические вопросы были включены в составленный автором ведомственный "Сборник методик".

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены и обсуждены на Всесоюзном Симпозиуме по радиозэкологии водных организмов (Рига, 1972); на семинаре секции радиоактивности Океанографической комиссии АН СССР (Севастополь, 1975); УИ совещании по радиохимическим и радиометрическим методам анализа объектов внешней среды (Ленинград, 1977); биологической секции Ученого Совета и объединенном кодлок-виуме лабораторий ВНИРО; заседании секции № I Ученого Совета ИПП и на семинаре ЛАМ (Москва, 1979).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 175 страницах машинописного текста, включает в себя 34 таблицы и 30 рисунков, состоит из введения, трех глав с выводами после каждой главы, заключения, общих выводов, рекомендаций, списка использованной литературы из 122 названий, включая 20 работ зарубежных авторов.

Фактической основой диссертации явились результаты мно-

гочисленных радиохимических и гамма-спектрометрических анализов проб морской воды и гидробионтов из различных районов Мирового океана. Сбор материалов и их анализы выполнялись самостоятельно или в сотрудничестве со специалистами бассейновых лабораторий Минрыбхоза СССР, которым автор выражает искреннюю признательность.

# Глава I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОД МИРОВОГО ОКЕАНА

Общее представление об объеме и составе проанализированных проб дает табл. I.

Таблица I

| Районы          | Объекты исследования | Код-во анализов на определение |           |
|-----------------|----------------------|--------------------------------|-----------|
|                 |                      | стронция-90                    | цезия-137 |
| Океаны          | Вода                 | 182                            | 164       |
|                 | Гидробионты          | 6740                           | 6740      |
|                 | Грунты               | 3                              | 3         |
| Моря СССР       | Вода                 | 54                             | 54        |
|                 | Гидробионты          | 2300                           | 2300      |
|                 | Грунты               | 35                             | 35        |
| Пресные водоемы | Вода                 | 155                            | 48        |
|                 | Гидробионты          | 1250                           | 1250      |
|                 | Грунты               | 12                             | 12        |

Практически были исследованы все основные виды промысловой ихтиофауны из различных районов мирового океана, а также пробы фито- и зоопланктона, макрофитов, грунтов и воды из этих районов. Для обработки экспедиционных материалов были использованы современные физические методы регистрации бета- и гамма-излучения радионуклидов, а также известные и апробированные радиохимические методики. Надежность и достоверность



определений были проверены участием в Международной интерка-  
либрации. Хорошая сходимость (отличие 5-10%) наших данных  
и обобщенных результатов МАГАТЭ свидетельствует о высокой  
надежности наших определений.

Выделены и рассмотрены три основные группы источников  
радиоактивного загрязнения: радиоактивные выпадения из ат-  
мосферы; радиоактивные отходы ядерной индустрии и энергетиче-  
ски; аварийные выбросы. Подтвержден вывод о том, что картина  
крупномасштабного радиоактивного загрязнения определяется  
преимущественно глобальными радиоактивными выпадениями из  
атмосферы, как следствие проведенных ядерных испытаний.

Общая характеристика глобального радиоактивного загряз-  
нения в 1960-1969 гг. На основе литературных данных (Попов,  
Патин, 1966; Гедесонов, Иванова, 1965; Нелепо, 1970; Поликар-  
пов, 1970; Вакуловский, 1975 и др.), относящихся к 1960-  
1969 гг., выявлены главные характеристики пространственного  
и временного распределения стронция-90 и цезия-137 в водах  
различных регионов Мирового океана. Показана устойчивая ши-  
ротная и региональная неравномерность распределения долгожи-  
вущих радионуклидов в поверхностных водах, в том числе зако-  
номерный спад удельной активности при переходе из северного  
в южное полушарие, а также повышение уровней радиоактивности  
во внутриконтинентальных и эпиконтинентальных морских бассей-  
нах и в неритических водах океана. Отмечен некоторый спад  
уровней загрязнения после 1964-1965 гг., т.е. после периода  
максимальных выпадений.

Уровни и характер радиоактивного загрязнения Мирового  
океана в 1970-1978 гг. (по данным автора).

Из анализа первичных и обобщенных наших данных, приве-  
денных в табл.2, а также с учетом данных предыдущих исследо-

ваний поле современного радиоактивного загрязнения мирового  
океана можно охарактеризовать следующими чертами:

Таблица 2

Средние концентрации радионуклидов в поверхностных  
водах Мирового океана (в расп./мин х 100 л)

| Наименование<br>района              | Год<br>отбора<br>проб | Стронций-90 |            | Цезий-137 |            | $\frac{Cs^{137}}{Sr^{90}}$ |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------|------------|-----------|------------|----------------------------|
|                                     |                       | X           | XX         | X         | XX         |                            |
| <u>Океаны</u>                       |                       |             |            |           |            |                            |
| Атлантический океан<br>(сев. часть) | 1972-<br>-1975        | 22          | $\pm 7,1$  | 33        | $\pm 6,2$  | 1,50                       |
| Индийский океан                     | 1976                  | 12          | $\pm 3,9$  | 19        | $\pm 3,4$  | 1,62                       |
| Тихий океан                         | 1974                  | 33          | $\pm 8,2$  | 50        | $\pm 12,4$ | 1,51                       |
| <u>Моря</u>                         |                       |             |            |           |            |                            |
| Охотское море                       | 1974                  | 31          | $\pm 7,9$  | 68        | $\pm 16,7$ | 2,2                        |
| Амурский залив                      | 1972                  | 28          | $\pm 7,1$  | 59        | $\pm 13,4$ | 2,1                        |
| Залив Петра Великого                | 1974                  | 64          | $\pm 12,5$ | 86        | $\pm 18,2$ | 1,34                       |
| Средиземное море                    | 1972                  | 57          | $\pm 17,6$ | 40        | $\pm 10$   | 0,7                        |
| Черное море                         | 1973                  | 83          |            |           |            |                            |
| Баренцево море                      | 1971                  | 46          |            |           |            |                            |
| Северное море                       | 1973                  | 99          |            |           |            |                            |
| Белое море                          | 1971                  | 116         | $\pm 21,6$ | -         |            |                            |
| Азовское море<br>(устье р. Дона)    | 1973                  | 155         |            |           |            |                            |
| Каспийское море<br>(сев. часть)     | 1971                  | 220         |            | 300       |            | 1,36                       |

x - среднее значение,

xx - среднеквадратичное отклонение.

-----  
- тенденция повышения удельной активности долгоживущих  
радионуклидов в ряду регионов: южные части Атлантического и  
Тихого океанов, Индийский океан, северные части Атлантичес-  
кого и Тихого океанов, глубоководные моря, замкнутые моря,  
пресные водоемы и реки;

- устойчивая неравномерность распределения радионукли-  
дов в поверхностных водах каждого из регионов, что, вероятно,



связано с особенностями турбулентного режима и перемешивания водных масс, а также с влиянием речного стока и других гидродинамических и гидрохимических факторов;

- сохранение в настоящее время картины региональной неравномерности загрязнения, подобной той, что имела место в период интенсивных ядерных испытаний. Указанная черта связана с относительной замкнутостью циркуляции и водообмена в пределах каждого из исследованных регионов, а также с более однородным распределением стронция-90 и цезия-137 по глубине;

- повышенная вариабельность концентраций радионуклидов во внутренних мелководных морях, прибрежных и устьевых районах, как следствие влияния биогеохимических факторов (накопление в живой и минеральной взвеси, седиментация) и речного стока.

Математическое моделирование крупномасштабного радиоактивного загрязнения. В связи с известными трудностями определения низких уровней содержания искусственных радионуклидов в морской воде (большие объемы проб воды, длительность и трудоемкость анализа, сложность идентификации радионуклидов и др.) и значительной вариабельностью определяемых концентраций несомненный интерес представляет разработка математической модели для описания крупномасштабных процессов загрязнения. Поэтому нами была разработана модель, с помощью которой простым расчетным путем можно оценить уровни глобального радиоактивного загрязнения любого водоема на любое время после различных вариантов реализованных ядерных взрывов. Многообразие факторов, определяющих уровни радиоактивного загрязнения водоемов в результате выпадений из атмосферы, можно представить в следующем общем виде:

$$Q_B = F(M_{1,2} \cdot K_{1,2} \cdot D_{1,2} \cdot S_3 \cdot V_B \cdot S_B \cdot L \cdot P \cdot R \cdot q \cdot t)$$

где:  $Q_B$  - уровни радиоактивного загрязнения водной среды;  
 $M_{1,2}$  - мощность взрыва воздушного, наземного;  
 $K_{1,2}$  - доля активности, инжестрированная в стратосферу от воздушного и наземного взрыва;  
 $D_{1,2}$  - доля реализованной мощности за счет реакции деления;  
 $R$  - коэффициент, учитывающий распад смеси продуктов деления;  
 $P$  - коэффициент, учитывающий сезонную неравномерность выпадений и скорость очищения атмосферы;  
 $q$  - удельный выход активности смеси продуктов деления на 1 Мт мощности взрыва;  
 $L$  - коэффициент широтной неравномерности выпадений;  
 $t$  - время после взрыва (в месяцах);  
 $S_3$  - площадь поверхности Земли;  
 $S_B$  - площадь акватории водоема или водосборного бассейна рек, впадающих в водоем;  
 $V_B$  - объем воды водоема или слоя равномерного перемешивания (в литрах).

С учетом ряда допущений и известных представлений об экспоненциальном характере выведения продуктов ядерных взрывов из атмосферы можно записать следующее выражение для расчета удельной активности водной толщ в зависимости от основных факторов:

$$A_{tj} = \sum_{i=1}^n M_{1,2} \cdot K_{1,2} \cdot D_{1,2} [P_n + (P_{n+1} - P_n) \sum_{j=i+1}^{j=i+m} N_j] \cdot t^{-1,2} \cdot L \cdot q \cdot S_3^{-1};$$

где:  $P_n = (1 - e^{-\frac{t \ln 2}{T}})$  - коэффициент учитывает очищение атмосферы при периоде полуочистки  $T$ ;

$A_{tj}$  - кумулятивный удельный запас активности, спустя  $j$  месяцев после взрыва в  $i$  месяце;  
 $n$  - число полных лет ( $n+m = t_j/12$ )  
 $m$  - число месяцев, прошедших после взрыва в  $i$  месяце;  
 $i$  - порядковый номер месяца, в котором реализован взрыв (принимает значения 1, 2, ..., 12, начиная с января);  
 $t^{-1,2}$  - закон распада смеси продуктов деления;  
 $N_j$  - коэффициент неравномерности выпадений в течение года.

Полученное выражение позволяет рассчитать удельную активность осколков деления в водной среде на любое время пос-



ле взрывов различной мощности.

Применимость модели проверена расчетом удельной активности стронция-90, являющегося одним из основных и наиболее изученных компонентов глобального радиоактивного загрязнения вод Мирового океана.

Для упрощения расчетов принимали следующие основные допущения: одномоментальность (январь 1960 г.) инъекции радиоактивных продуктов в атмосферу, произведенных за весь период интенсивных ядерных испытаний; условное среднее время получения атмосферы от стронция-90, равномерность распределения радионуклида в слое активного перемешивания в океане и в толще водных масс внутренних водоемов и мелководных эпиконтинентальных морей.

В этом случае удельная активность водоема определяется как:

$$Q_z = (K_1 \cdot D_1 \cdot M_1 + K_2 \cdot D_2 \cdot M_2) q \cdot R \cdot P \cdot L \cdot S_8 \cdot V_8^{-1} \cdot S_3^{-1}$$

Величины основных параметров, взятые из литературных источников, принимались следующими:  $q = 0,1$  Мкюри/Мт;  $M_1 = 406,2$  Мт;  $M_2 = 104,1$  Мт;  $D_1 = 0,34$ ;  $D_2 = 0,52$ ;  $K_1 = 0,85$ ;  $K_2 = 0,15$ ;  $1/2 T = 2,5$  года.

Учитывая параметры  $P, L$ , вычисленные по известным данным, удельная активность стронция-90 в водах любого водоема, в любое время после ядерных взрывов рассчитывается по формуле:

$$Q_z \approx 25 \cdot P \cdot L \cdot S_8 \cdot V_8^{-1} \cdot e^{-0,0244 \cdot t} \text{ (мкюри/л)}$$

Результаты расчета, основанного на перечисленных выше допущениях и принятых величинах, приведены в табл.3. При сравнении расчетных концентраций с фактическими нашими (см. табл.2) и литературными данными нетрудно видеть хорошее соответствие этих величин.

Таблица 3

Расчетные и фактические измеренные концентрации стронция-90 в поверхностных водах мирового океана

| Регион Мирового океана | Концентрация стронция-90, расп/мин 100 л |      |                      |      |       |      |
|------------------------|------------------------------------------|------|----------------------|------|-------|------|
|                        | расчетная в                              |      | средняя измеренная в |      |       |      |
|                        | 1968                                     | 1972 | 1967                 | 1968 | 1970  | 1972 |
| Атлантический океан    |                                          |      |                      |      |       |      |
| северная часть         | 21,0                                     | 19,7 | 24                   | -    | 22-24 | -    |
| южная часть            | 4,4                                      | 4,1  | 14                   | -    | -     | -    |
| Индийский океан        | 5,5 <sup>х</sup>                         | 5,1  | -                    | -    | -     | -    |
| Охотское море          | 30                                       | 29   | -                    | -    | -     | 31   |
| Северное море          | 125                                      | 112  | 69                   | 62   | 95    | 99   |
| Баренцево море         | 39                                       | 37   | -                    | -    | -     | 46   |
| Балтийское море        | 153                                      | 143  | 139                  | 149  | 155   | -    |
| Белое море             | 116                                      | 108  | -                    | -    | 71    | 116  |
| Черное море            | 65                                       | 61   | -                    | -    | -     | 120  |
| Азовское море          | 1560                                     | 1460 | -                    | 1000 | 248   | 343  |
| Средиземное море       | 28                                       | 26   | 11                   | 31   | 52    | -    |

х) результаты без учета вклада тропосферных выпадений и обмена водных масс с Тихим океаном.

К числу факторов, объясняющих расхождение измеренных и расчетных величин для Азовского моря, следует отнести его мелководность, влияние речного стока и интенсивного водообмена с Черным морем, имеющим более низкую удельную активность. Что касается Черного моря, то указанное несоответствие объясняется меньшей глубиной слоя равномерного распределения радионуклида по сравнению с глубиной равной 350 м, принятой в расчетах уровней для открытого океана. Такого рода сопоставление расчетных и фактических уровней может служить основой для суждения об интенсивности крупномасштабных процессов перемешивания вод открытого океана и отдельных морей. Показанная в табл.3 хорошая сходимости фактических и расчетных величин, даже с учетом расхождения по некоторым морям, несомненно,



свидетельствует о применимости и перспективности использования разработанной довольно простой модели как для описания, так и для прогнозирования крупномасштабных ситуаций радиоактивного загрязнения не только Мирового океана, но и поверхности суши. Аналогичный расчет может быть выполнен для других радионуклидов и смеси продуктов деления при любых вариантах одиночных или серийных ядерных взрывах, сопряженных с формированием атмосферного резервуара, подобного тому, какой существовал после интенсивных ядерных испытаний. Ошибка оценочных расчетов для смеси продуктов деления будет существенна только в первые месяцы, а в последующий период она будет снижаться со скоростью распада самой смеси.

Использование такого рода модели и подхода позволит значительно сократить дорогостоящие и трудоемкие работы, связанные с контролем уровней крупномасштабного радиоактивного загрязнения морей и океанов.

## Глава 2. ПОВЕДЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМАХ

Выпавшие из атмосферы искусственные радионуклиды накапливаются в различных компонентах водной экосистемы и включаются в биохимические циклы перераспределения и трансформации вещества в водоеме. Рассмотрены процессы накопления некоторых микрокомпонентов морской среды в биологическом материале и даны количественные характеристики этого процесса для стронция-90, цезия-137 и ряда металлов, являющихся изотопными носителями соответствующих радионуклидов.

В связи с отсутствием современных данных о распределении искусственных радионуклидов по компонентам пелагической части экосистемы океана было выполнено радиоэкологическое обследование значительной части Индийского океана в диапазоне широт

от 15°с.ш. и до 55°ш., а также в Красном море, где, как известно, до последнего времени отсутствовали локальные загрязнения. Определены концентрации в воде, грунте, гидробионтах и рассчитаны коэффициенты накопления стронция-90 и Цезия-137 в компонентах экосистемы. Полученные величины оказались существенно больше, чем характерные значения для стабильных аналогов, что, впрочем, отмечалось рядом авторов и раньше.

В исследованном районе были определены также концентрации и коэффициенты накопления в тех же образцах стабильного стронция и ряда металлов — изотопных носителей соответствующих радионуклидов, для которых отсутствуют прямые данные об их распределении в открытой части океана. Рассчитанные коэффициенты накопления железа, кобальта, стронция, свинца, кадмия, марганца, цинка, меди, никеля для основных составляющих морской экосистемы представляют интерес в качестве исходных характеристик миграционных способностей этих элементов.

Несмотря на значительную вариабельность оказалось возможным выделить характерные пределы величины полученных нами коэффициентов накопления, которые составили  $10^2$ – $10^3$  для гидробионтов и  $10^5$ – $10^7$  для взвеси и грунтов. Максимальные коэффициенты накопления относятся к марганцу и меди, а минимальные — к железу и цинку. Для стронция характерны минимальные коэффициенты накопления (1–10).

Показанное нами заметное различие коэффициентов накопления стабильного стронция и стронция-90, вероятно, связано с различными формами нахождения этих микроэлементов.

В некоторых образцах гидробионтов (фитопланктон) и воде не удалось обнаружить и идентифицировать стронций-90, что свидетельствует о достаточно низком уровне загрязнения этих районов океана.



Изучение глобальной картины радиоактивного загрязнения промысловых гидробионтов представляет не только радиоэкологический, но и практический, важный для человека, радиационно-гигиенический интерес.

Результаты многочисленных (более 10 тыс. за период 1968-1976 гг.) определений стронция-90 и цезия-137 в морских и пресноводных гидробионтах (главным образом в промысловой ихтиофауне) обработаны методами статистического и регрессионного анализа. Некоторые результаты анализов осреднялись по видам рыб, районам и годам. Изученные рыбы принадлежат к 65 видам из 10 отрядов, включая океанические, неритические, солоноватоводные, проходные и т.д.

Из совокупности полученных материалов, их анализа и обобщения можно констатировать:

- значительный разброс концентраций, который объясняется различием уровней загрязнения среды обитания рыб, типом питания, видовыми и возрастными различиями и др.;

- закономерное нарастание удельной активности в рыбах, обитающих в океане, прибрежных районах, внутренних морях и мелководных водоемах суши, аналогично тому, которое было установлено и отмечено выше для воды этих регионов;

- средние концентрации для океанических рыб, выловленных в различных районах, достоверно различимы и составляют 26 и 21 пкюри/кг сырой массы для стронция-90 в костной и цезия-137 в мышечной тканях соответственно;

- заметное снижение отношения цезия-137 к стронцию-90 в пресноводных рыбах по сравнению с океаническими, что связано с более прочной фиксацией цезия-137 в почвах и во взвешенном материале в водоеме и, как следствие этого, более интенсивным его выведением в донные отложения по сравнению со

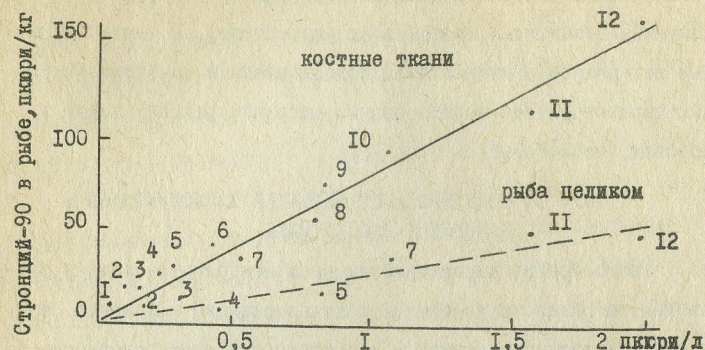


Рис.1. Корреляция содержания стронция-90 в промысловой ихтиофауне и воде. (1,2,3,4 — районы океанов; 5,6,7,8,9 — моря; 10,11,12 — реки и озера).

стронцием-90. По этой же причине бентофаги содержат значительно больше цезия-137, чем пелагические рыбы.

На основе наших данных о концентрациях стронция-90 в воде и рыбах различных водоемов построена коррелятивная зависимость, показанная на рис.1. Как видно, зависимость имеет линейный характер и коэффициенты корреляции близки к единице, а коэффициенты накопления для всей промысловой ихтиофауны составляют 30 и 75 для рыбы целиком и костной ткани соответственно. Фактические значения коэффициентов накопления, естественно, варьируют в зависимости от вида, типа питания и других экологических факторов.

Сопоставление полученных нами осредненных концентраций стронция-90 и цезия-137 в промысловых рыбах с существующими нормами годового поступления этих радионуклидов с продуктами питания в организм человека (НРЕ-76) показывает безвредность рыбы и рыбопродуктов с радиационно-гигиенической точки зрения.

Полученные фактические материалы о распределении искусственных радионуклидов и их некоторых стабильных аналогов в



океанических и морских экосистемах (включая коэффициенты накопления в основных компонентах экосистемы), а также известные литературные данные были использованы в качестве исходных параметров при моделировании миграции радионуклидов в морских экосистемах.

### Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМАХ

Многообразие характеристик всех компонентов водных экосистем, а также трудности их количественного выражения (трудоемкость радиохимических и изотопных анализов, сложность отбора значительных биомасс гидробионтов и др.) определяют необходимость разработки единого математического подхода для изучения миграции микропримесей в водоеме.

Для решения этой задачи мы использовали системный подход, основанный на хорошо известной теории графов, или, точнее, теории потоков в сложных сетях. Обоснована применимость теории потоков в сетях для решения задач транспорта радионуклидов в водоеме и показаны возможности такого подхода для моделирования миграции микропримесей.

Основные требования теории заключаются в том, чтобы система была сильно связана и по связям (дугам) существовали стационарные потоки микропримеси. Кроме того, на систему накладываются следующие условия и ограничения:

$$\sum_y P(x, y) - \sum_y P(y, x) = \begin{cases} V_y & \text{при } x=S \\ 0 & x \neq S, t \\ -V_x & x=t \end{cases}$$

Это означает, что алгебраическая сумма потоков в любом узле ( $x$  или  $y$ ) равна нулю, кроме источника ( $S$ ) и стока ( $t$ ), в которых поток равен величине ( $V$ ).

Водные экосистемы вполне удовлетворяют этому требованию,

так как они представляют целостные функциональные структуры и имеют большое число компонентов (узлов) и связей (дуг). В силу биогеохимической циркуляции элементов в природе можно полагать, что потоки вещества в сложных водных экосистемах будут установившимися, во всяком случае среднегодовые потоки. В то же время потоки не могут превышать пропускную способность связи, т.к. процессы миграции в природных системах сбалансированы. Понятно, что после насыщения емкости компонента водной экосистемы входящие и выходящие потоки радионуклида будут равны между собой.

В качестве "источника" поступления радионуклида в водную экосистему можно принять атмосферные выпадения или речной сток, а в качестве депонирующей компоненты (стока) — донные отложения. Другие основные компоненты системы представляются в виде промежуточных узлов с дугами между ними, по которым существует передача (транспорт) радионуклида. Таким образом, мы получаем граф миграции радионуклида в водной экосистеме.

Едва ли не самым трудным, в плане практического использования такой модели, является отыскание функциональных зависимостей всех потоков или хотя бы определения их средних значений. Поэтому мы упростили граф и оставили основные компоненты (узлы) и связи (дуги), которые характерны для всех водных экосистем и которые могут быть выражены количественно для конкретных водоемов. Граф упрощенной модели миграции радионуклида в экосистеме Азовского моря показан на рис.2.

В общем виде поток из  $i$  узла в  $j$  узел определяется так:

$$P_{ij} = a_{ij} \cdot M_i \cdot q_i;$$

где:  $a_{ij}$  — доля потока из  $i$  узла в  $j$  узел (дробность потока);  
 $M_i$  — масса компонентов;  
 $q_i$  — концентрация радионуклида в компонентах.



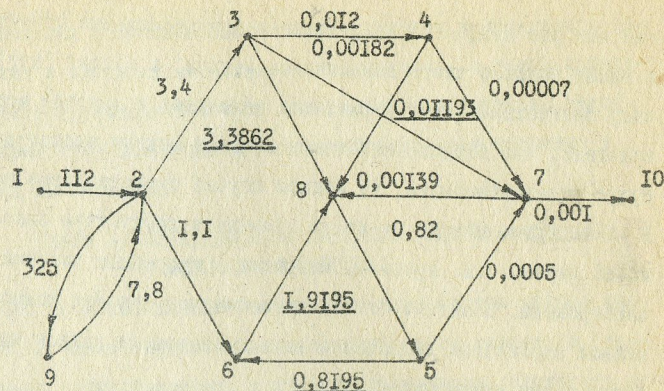


Рис.2. Граф миграции стронция-90 в экосистеме Азовского моря

1 - речной сток; 2 - вода Азовского моря; 3 - фитопланктон; 4 - зоопланктон; 5 - зообентос; 6 - речная терригенная взвесь; 7 - икhtiофауна; 8 - донные отложения; 9 - воды Черного моря; 10 - выловленная рыба; (цифры - среднегодовые потоки в жюри, подчеркнутые цифры - потоки, вычисленные по графу).

Суммарный поток, входящий в  $j$  узел, равен:

$$P_j = \sum_{i=0}^m P_{ij}$$

Функционально выразить все потоки не представляется возможным, т.к. величины  $M_i, P_i$  сами являются функциями многих переменных. Однако, если полагать, что среднегодовые потоки радионуклида в установившейся системе не сильно отличаются за десятки лет, то получаем граф миграции со стационарными среднегодовыми потоками. Понятно, что для конкретных водоемов не всегда имеются данные о биопродукции, концентрации радионуклида, дробности потока, поэтому расчетные формулы потоков могут быть отличны от общей.

Разработаны и обоснованы достаточно удобные формулы расчета потоков стронция-90 для любого водоема. Используя теории потоков в сетях и разработанные подходы, можно решать следующие задачи: вычислить величину неопределенных потоков; опре-

делить путь и величину максимального потока; оценить время очищения водоема; оптимально планировать исследовательские работы на неизученном водоеме. Можно также решать и другие задачи, например, подбирая величину неизвестного параметра при известных ограничениях потоков по дугам, можно определить более точно эту величину, которую определить экспериментально в реальном водоеме невозможно.

Изложенное выше было использовано нами для изучения миграции стронция-90 в экосистемах шельфовой зоны океанов, Белого, Северного, Балтийского, Черного, Азовского, Каспийского морей, т.е. для таких регионов Мирового океана, в которых сильно отличаются основные гидрологические и биологические характеристики. В практических расчетах потоков использовались различные входные параметры, в т.ч. удельная активность воды (полученная расчетным путем по нашей модели), коэффициенты накопления, биопродуктивность и биомасса гидробионтов основных трофических уровней, зольность гидробионтов, соотношение вылова рыб (фитофаги, зоофаги, бентофаги), объем твердого речного стока, основные гидрологические характеристики и др.

Неизвестные потоки стронция-90 вычисляются на графе или с помощью матрицы потоков. В качестве иллюстрации на рис.2 приведены величины потоков, вычисленные по формулам и определенные с помощью графа (подчеркнуты). На графе видно, что путь максимального потока и его величина отыскиваются довольно просто. Однако в случае сложных экосистем при наличии большого числа составляющих и связей необходимо применять специальные математические методы и электронно-вычислительную технику.

Анализ полученных материалов и графов (графы построены,



для всех перечисленных выше регионов Мирового океана) показал, что время очищения водоема определяется главным образом водообменом с другими водоемами (Азовское, Белое моря). Если рассматривать очищение собственно воды водоема, то легко увидеть, что радионуклид выводится из воды в донные отложения за счет осаждения терригенной взвеси и отмерших организмов. Эти потоки наибольшие. Остальные потоки, связанные с миграцией стронция-90, на несколько порядков меньше, особенно потоки с выловленной рыбой.

Для изучения нами водных экосистем определены некоторые неизвестные потоки ( $P_{3-8}$ ,  $P_{7-8}$ ,  $P_{4-8}$ ,  $P_{7-8}$ ), найдены пути и величина максимального потока, оценено время полуочищения водоемов, определен запас стронция-90 в воде и грунте водоема в водосборном бассейне (по состоянию на 1972 г.). Все необходимые параметры в качестве входных величин для моделирования, а также рассчитанные величины сведены в таблице.

С целью проверки правильности математических моделей и разработанных подходов мы рассчитали изменение кумулятивного запаса в донных отложениях, водосборном бассейне, а также удельной активности стронция-90 в воде некоторых водоемов. Вычисления проводились с учетом каждой крупной серии взрывов, проведенных с 1950 по 1962 г. С помощью моделей обоснован прогноз изменения основных радиоэкологических характеристик Азовского, Балтийского, Каспийского и Белого морей вплоть до 2000 г. На рис.3 приведены расчетные кривые, показывающие характер изменения удельной активности стронция-90 в воде и характер изменения суммарной активности стронция-90, выпавшего на Землю.

Неплохое совпадение расчетных значений и фактически измеренных, несомненно, свидетельствует о применимости моде-

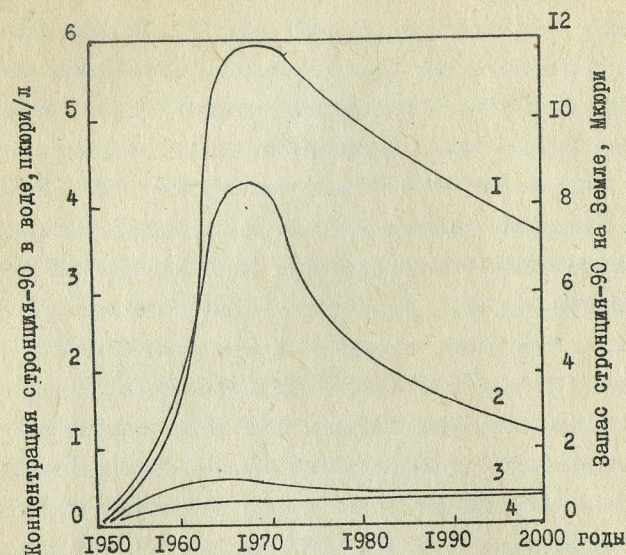


Рис.3. Рассчитанное изменение кумулятивного запаса стронция-90 на поверхности Земли (1) и концентрации стронция-90 в воде некоторых водоемов с учетом водообмена с другими водоемами, влияния речного стока и миграции радионуклида в экосистеме (2 — Азовское, 3 — Балтийское, 4 — Каспийское моря).

лей и подходов, разработанных в диссертации, для оценок и прогноза радиоэкологической ситуации в Мировом океане. В целом разработанный математический подход выгодно отличается от существующих моделей своей простотой, наглядностью и доступностью для практического моделирования процесса глобального загрязнения Мирового океана.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертации осуществлена попытка изучения крупномасштабного радиоактивного загрязнения Мирового океана на основе фактических материалов и математических методов и подходов моделирования распределения и миграции искусственных радионуклидов в морских экосистемах.



Вопрос о правомочности и перспективности такого рода подходов представляет несомненный интерес и актуальность в связи с существованием фона глобального радиоактивного загрязнения и широким использованием атомной энергии в мирных целях. Основные выводы работы заключаются в следующем:

1. На основе разработанной в диссертации модели, позволяющей вычислить удельную активность воды любого водоема и суммарную активность кумулятивного запаса на суше для любого радионуклида на любое время после взрыва любой мощности, рассчитаны концентрации стронция-90 в воде морей и океанов по состоянию на 1968 и 1972 гг. Хорошая сходимость расчетных и фактических измеренных оригинальных и обобщенных литературных данных доказывает перспективность использования простых математических моделей для оценки уровней глобального радиоактивного загрязнения, во всяком случае для долгоживущих радионуклидов.

2. Обоснована перспективность использования теории графов при изучении распределения и миграции загрязняющих веществ (радиоактивных и химических) в водных экосистемах.

3. Разработана математическая модель миграции радионуклидов в водных экосистемах. Рассчитаны потоки стронция-90, построены и проанализированы графы миграции стронция-90 в экосистемах шельфовой зоны океанов, Балтийского, Черного, Северного, Каспийского, Азовского морей.

На основе модели определены путь и величина максимального потока стронция-90, другие неизвестные потоки, время подлущищения водоема от стронция-90 и оценен запас радионуклида в водосборном бассейне рек, в воде и грунте исследованных водоемов.

4. На основе фактических и известных литературных материалов выявлены главные черты современного крупномасштабного

загрязнения долгоживущими радионуклидами (стронцием-90 и цезием-137) вод Мирового океана, в том числе:

- увеличение средних концентраций при переходе от океанических вод южного к северному полушарию и далее от океана к глубоководным морям, мелководным со слабым водообменом с океаном замкнутым морям и пресноводным водоемам и рекам;

- установлено существенное влияние речного стока и особенностей гидрологического режима на изменение концентраций стронция-90 и цезия-137 в поверхностных водах прибрежных районов водоемов;

- определенное нами отношение цезия-137 к стронцию-90, равное 1,5-1,6, свидетельствует об отсутствии заметного фракционирования этих радионуклидов в поверхностных водах открытого океана под влиянием биогеохимических факторов;

- общее снижение и нивелирование уровней современного регионального загрязнения по сравнению с 1964-1965 гг. и относительная стабилизация этих уровней с 1972 по настоящее время.

5. Впервые получены фактические материалы о содержании и распределении искусственных радионуклидов и их некоторых химических аналогов в основных компонентах морских экосистем. Определены характерные коэффициенты накопления этих микропримесей в различных гидробионтах, которые были использованы при моделировании миграции радионуклидов в морских экосистемах.

6. На основе статистически обработанных многочисленных (более 10 тыс.) данных и корреляционного анализа получены достоверные средние концентрации стронция-90 и цезия-137 в рыбах из различных регионов мирового океана, а также определены обобщенные характерные коэффициенты накопления стронция-90 для основных видов промысловых рыб.

7. На основе всех материалов диссертации и соответствующим



щих литературных данных рассчитаны изменения концентраций стронция-90 в водах Мирового океана и запаса этого радионуклида на Земле с 1954 г. по настоящее время. Также дан обоснованный прогноз (до 2000 г.) изменения уровней стронция-90 в воде, донных отложениях, водосборном бассейне некоторых морских регионов, расположенных в различных физико-географических зонах.

#### РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В связи с трудоемкостью и высокой стоимостью прямых наблюдений за состоянием крупномасштабного радиоактивного загрязнения морских и пресных водоемов представляется целесообразным использовать для оценки и прогноза радиозэкологических ситуаций разработанные в диссертации математические модели и подходы. Для дальнейшего развития предложенных методов необходимо использовать современную вычислительную технику.

2. Установленная в диссертации (по фактическим данным и прогностическим оценкам) относительная устойчивость и даже некоторая тенденция к снижению уровней радиоактивного загрязнения пелагиали океана позволяет рекомендовать сокращение объема наблюдений за уровнями в этих районах, усилив в то же время комплексные радиозэкологические исследования в районах с повышенным загрязнением и в зонах локального сброса радиоактивных отходов.

3. Разработанные в диссертации модели глобальных радиоактивных выпадений и миграции радионуклидов в водных экосистемах могут быть использованы при установлении допустимых режимов и норм сброса радиоактивных отходов в водоемы, а также при изучении и прогнозировании крупномасштабной и региональной ситуации загрязнения водоемов другими токсическими веществами и химическими элементами.

4. Фактические материалы диссертации об уровнях радиоактивного загрязнения промышленной ихтиофауны Мирового океана могут быть использованы для оценок и расчетов радиационно-гигиенического характера, связанных с потреблением морепродуктов, загрязненных стронцием-90 и цезием-137.

#### Список работ по теме диссертации

1. Патин С.А., Петров А.А. Искусственная радиоактивность морской воды и промышленных гидробионтов Мирового океана. В сб. "Радиозэкология водных организмов", вып. 2, Рига, изд-во "Зинатне", 1973, с. 200.

2. Петров А.А. Современные уровни радиоактивного загрязнения промышленных рыб. Труды ВНИРО, т. 100, 1974, с. 55.

3. Петров А.А., Овчинникова С.С., Комагуров В.Е. Содержание стронция-90 в водах Баренцева и Белого морей. Тр. ВНИРО, т. 100, 1974, с. 37.

4. Патин С.А., Петров А.А. Расчетный метод оценки уровней глобального радиоактивного загрязнения поверхностных вод Мирового океана. Метеорология и гидрология, № 7, 1976, с. 105.

5. Петров А.А., Овчинникова С.С., Комагуров В.Е. Современный уровень глобального загрязнения океанических и морских вод стронцием-90 и цезием-137. Тр. ВНИРО, т. 134, 1978, с. 35.

6. Петров А.А. Искусственные радионуклиды в промысловых рыбах Мирового океана и пресных водоемах. Тр. ВНИРО, т. 134, 1978, с. 45.

7. Патин С.А., Петров А.А. Содержание стронция-90 и цезия-137 в промысловых рыбах. "Радиобиология", т. 18, 1978, с. 730.

8. Петров А.А. Об исследовании миграции микропримесей в морских экосистемах методом графов. "Гидробиологический журнал", № 4, 1979.