

**Национальная Академия Наук Украины
Институт биологии южных морей
им. А.О. Ковалевского**

**100-летнему юбилею
со дня рождения Владимира
Алексеевича Водяницкого
посвящается**

МОРСКИЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Ответственный редактор
доктор биол.наук С.М. Коновалов**

Институт биологии
южных морей АН УССР

БИБЛИОТЕКА

№ 37475

Севастополь, 1994

УДК: 539.16:551.46.09:543.31(262.5)

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ БИОЛОГИИ В СБС АН СССР – ИНБЮМ НАНУ (1956-1994)

Г.Г. Поликарпов, В.Н. Егоров, Л.Г. Кулебакина, Г.Е. Лазоренко,
В.Г. Цыцугина, Н.С. Рисик, С.Б. Гулин, М.Б. Гулин, Н.А. Стокозов,
Н.В. Жерко, С.К. Светашева

Краткий исторический экскурс. общие сведения

У самого начала всякого дела всегда имеется его зародыш. Развиваться зародышу или нет – целиком определяется хозяином положения. К счастью, таким научным хозяином был директор Севастопольской Биологической Станции им. А.О. Ковалевского Академии Наук СССР профессор Владимир Алексеевич Водяницкий.

Зародышем для организации и выполнения работ в Севастополе по радиоэкологии, а затем и по хемозоологии водных организмов оказался в 1956 г. первый автор этой статьи, а тогда аспирант третьего года обучения на биофаке МГУ по кафедре биофизики (зав. кафедрой проф. Б.Н. Тарусов), по образованию – зоолог, ученик профессора В.С. Елпатьевского в Саратовском университете. В 1956 г. был первый выпуск в нашей стране радиобиологов через аспирантуру. На каждого распределяемого пришло по десятку и более предложений на работу из институтов от Москвы и Ленинграда до Ташкента. В тот период аспирантом по физиологии рыб на Севастопольской биологической станции АН СССР был Марлен Павлович Аронов, знавший упомянутого выше аспиранта из Москвы по биофаку Белорусского университета. Он в ярких красках описал возможности для творческой научной деятельности на СБС. Затем директор СБС АН СССР проф. В.А. Водяницкий встретился с аспирантом из МГУ в московской гостинице АН СССР "Якорь". Далее последовала заявка с предложением должности младшего научного сотрудника на СБС и

распределение Главного Управления университетов СССР на работу с 5 сентября 1956 г. Начался процесс, вначале очень медленный, по организации и по развитию лаборатории биофизики-радиобиологии в здании СБС на Приморском бульваре с одновременным постепенным проектированием отдельного радиобиологического корпуса и осуществлением летних исследований, начиная с 1957 г., на биостанции Миассово в Ильменском заповеднике в Челябинской области под руководством проф. Н.В. Тимофеева-Ресовского и Е.А. Тимофеевой-Ресовской. Эти подробности сообщаются для того, чтобы подчеркнуть необычайно высокое понимание и великодушную терпимость со стороны Владимира Алексеевича к ("непонятым" с точки зрения тогдашней бухгалтерии) командировочным запросам младшего научного сотрудника-радиобиолога, пропадавшего подолгу в первые годы то в Москве во Всесоюзной конторе "Изотоп", в Академснабе и на Всесоюзном большом изотопном практикуме системы Академии наук (руководитель проф. И.Н. Верховская) в институте биофизики АН СССР, то на Урале в группе "водников" у Тимофеевых-Ресовских. Далее удалось по строгим требованиям оборудовать изотопную 3-го класса в помещении СБС у Шлюпочного сарая, а затем освоить и сам "сарай".

Важное влияние на научную общественность страны и города оказала статья проф. В.А. Водяницкого "Допустим ли сброс отходов атомных производств в Черное море?" [2]. В 1963 г. СБС АН СССР была передана в систему АН УССР в качестве Института биологии южных морей (ИнБЮМ). Продолжались поиски места для построенного впоследствии в 1973 г. радиобиологического корпуса в Мартыновой бухте, ставшего в системе Академий наук лучшим для морских радиоэкологических исследований в стране. Вспоминается один из эпизодов выделения возможного места для строительства такого корпуса в Казачьей бухте, когда начальник береговой обороны КЧФ, директор ИнБЮМ АН УССР проф. В.А. Водяницкий и зав. отделом радиобиологии д.б.н. Г.Г. Поликарпов обследовали выделявшуюся ИнБЮМ часть подземных укреплений на мысе Херсонес, демонтировавших по распоряжению Н.С.Хрущева.

Однако, на другой день сбили разведывательный самолет Пауэрса в районе Челябинска и последовал отказ в выделении этого участка. Затем предлагались бывшие укрепления на мысе близ Константиновского равелина, но вскоре американский бомбардировщик РБ-16 вторгся в воздушное пространство над Мурманском. Вновь был отказ. Далее предлагали далекую старую погранзаставу на Феоленте и участок около маяка слева от бухты Омега, но Управление капитального строительства АН УССР отказалось строить там из-за отсутствия поблизости коммуникаций. Наконец, командование КЧФ и власти города любезно выделили удобный участок в районе Мартыновой бухты, отдав предпочтение ИнБЮМу, как солидному учреждению в Севастополе. Конечно, было очень трудно попасть в план АН УССР то одного, то другого года строительства.

Кроме очевидности и поддержки многих научных организаций, пожалуй, решающим доказательством необходимости строительства было непрерывающееся проведение растущим коллективом работ по морской радиоэкологии с предельной интенсивностью и с большим энтузиазмом в имевшихся тогда условиях. Росли кандидаты наук-радиоэкологи в стенах СБС, а затем ИнБЮМ. Одним из аргументов был также выход в 1964 г. книги "Радиоэкология морских организмов" [18] и ее расширенного перевода в 1966 г. "*Radioecology of aquatic organisms*" [34]. Эта книга оказалась первой монографией в мировой литературе в данной области знания.

В то время во всем мире наступала ядерная эра. Испытывались атомные и водородные бомбы США и СССР, а затем также Англии, Франции и КНР. В конце 1950-х – начале 1960-х годов Президиум АН СССР часто запрашивал данные радиоэкологических исследований, например, для очередной Пагуоушской конференции. Приходят на память бессонные ночи по срочному оформлению для этой цели материалов, которые утром в отпечатанном виде доставлялись прямо к поезду Севастополь–Москва проф. В.А. Водяницкому, уезжающему с этой срочной информацией в Москву. А в Москве его уже ждал курьер

по доставке в международный аэропорт данного материала вице-президенту АН СССР акад. М.Д. Миллионщикову, который увозил их с собой на конференцию.

Насколько был широк охват аспектов морской (водной) радиоэкологии на СБС АН СССР и в ИнБЮМ АН УССР – судить читателям по сжатому материалу, в основном, самого недавнего периода. Его авторы – многие сотрудники отдела радиационной и химической биологии (зав., д.б.н. В.Н. Егоров), включающего лабораторию сравнительной радиоэкологии и молисмологии (зав., гл.н.с. с 1991 г., академик Г.Г. Поликарпов), лабораторию динамической хемотропологии (зав., к.б.н. С.Б. Гулин), лабораторию радиохемотропологии (зав., к.б.н. Н.С. Рисик), группу радиоэкологического мониторинга (рук., к.б.н. Л.Г. Кулебакина) и группу экологической цитогенетики (рук., к.б.н. В.Г. Цыцугина), а также службу радиационной безопасности (нач., вед. инж. Г.А. Фрейман). Важные самостоятельные исследования выполняются: ст.н.с., к.б.н. Г.Е. Лазоренко по биологическому качеству глубинных вод, ст.н.с., к.б.н. Н.В. Жерко (Деминой) по полихлорбифенилам, н.с., к.б.н. С.К. Светашевой по ртути, ст.н.с. к.б.н. М.Б. Гулиным по хемотропологии анаэробной и смежной зон Черного моря, ст.н.с. к.б.н. Н.Н. Терещенко по "Фазеолиновому дозору" и совместно с м.н.с. А.А. Коротковым по Рn и Am в водных системах, м.н.с. Н.Ю. Мирзоевой по ^{90}Sr в системе водоем-охладитель ЧАЭС-Днепровский каскад-СКК-Черное море, м.н.с. Н.А. Стокозовым по гидрологическим механизмам переноса радионуклидов в Днепре, Дунае, Черном и Эгейском морях. Библиография отдела составлена ст. инж. З.М. Эксузян [27,28].

Приведем из числа многих только одно высказывание "со стороны" по поводу деятельности севастопольских радиоэкологов в ИнБЮМ. В своем капитальном двухтомном труде "Радиоэкология: ядерная энергетика и окружающая среда" проф. Ф. Уард Уикер (университет штата Колорадо) и проф. Винцент Шульц (университет штата Вашингтон) пишут: "С начала 40-х годов рост радиационной экологии происходил параллельно развитию ядерной технологии в мире с

наибольшими достижениями в США и СССР. Для историка оно связано с такими местами, как Севастополь (СССР), Хельсинки (Финляндия), Кадараш (Франция), Энвистак (Атолл), Анактувук Пасс и остров Амчитка (Аляска), Монако и Оак Ридж (Теннесси)... [38, стр. 4].

В июне 1994 г. шесть сотрудников отдела избраны членами Крымской Академии наук. Отметим, что в 1994 г. в ИнБЮМ имеются: офис президента Европейского отделения Международного Союза Радиоэкологов (штаб-квартира в Брюсселе) и офис в СНГ вице-президента Консультативного Комитета по защите морей (штаб-квартира в Лондоне). По линии радиоэкологии и хемозкологии ИнБЮМ представлен в секции мореведения (академик-секретарь акад. В.Н. Яковлев) Крымской Академии наук, отделении общей биологии (академик-секретарь акад. Ю.Ю. Глеба) Национальной Академии наук Украины, в Научном Совете по проблемам радиобиологии Российской Федерации (председатель – проф. Е.Б. Бурлакова) и в международном Институте экологии в Германии (директор – проф. Отто Кинне), а также в редакциях и редакционных советах журналов "Экология моря" (Севастополь–Киев), "Гидробиологического журнала" (Киев), "Ойкумена" (Киев), "Радиационная биология. Радиоэкология" (Москва), "Radioecology" (Praha), "Marine Ecology Progress Series" (Nordbunte), "Environmental Radioactivity" (Monaco-London).

Остановимся на основных направлениях исследований в отделе радиационной и химической биологии (ОРХБ) ИнБЮМ в их развитии.

Естественная радиоактивность

В 1958 г. была проведена радиометрическая рекогносцировка Крыма от Севастополя через горный регион до Карадага и выполнены экспериментальные исследования по накоплению ^{238}U и ^{234}Th черноморскими водорослями [17]. С 1966 г. в ОРХБ начали проводить исследования естественной радиоактивности объектов окружающей среды в природных условиях. В начале это был район вулканической группы Карадага в Крыму [10,24], который характеризуется

повышенной естественной радиоактивностью. Впоследствии была оценена способность черноморских организмов концентрировать уран в природных условиях. Оказалось, что величины коэффициентов накопления урана достигали единиц у рыб, десятков единиц – у зеленых водорослей, до сотен единиц – у бурых, красных водорослей и моллюсков. Показано, что уран находится в биовеществе в двух формах: ионно-дисперсной (атомы урана рассеяны) и агрегированной или псевдоколлоидной (микроскопления атомов урана) [24]. Агрегаты атомов урана формируются в живых организмах в природных условиях. Концентрация урана в микроагрегатах в тысячи и десятки тысяч раз более высокая, чем его средняя концентрация в данном органе, ткани или целом организме. Соответственно и дозы радиации, создаваемые в месте локализации микроагрегатов урана на несколько порядков величин будут выше, чем средние дозы от рассеянного урана в организме.

Способность образовывать псевдоколлоиды в живых организмах имеют и другие естественные радионуклиды, как ^{228}Ra , ^{232}Th , а также искусственные трансурановые радионуклиды и в местах локализации таких "горячих" микрочастиц будет формироваться мощность дозы в сотни и тысячи рад $\cdot \text{ч}^{-1}$. Под влиянием радиации с такими дозами живые клетки буквально "сжигаются". Побочными эффектами, как известно, является возникновение рака, сарком и т.д. Это необходимо учитывать при изучении накопления, выведения, миграции радионуклидов по пищевым цепям, распределения и их действия в экосистемах. Особенно это важно при оценке радиационного воздействия радионуклидов, поступающих в организм человека с пищей, водой или аэральным путем.

Искусственная радиоактивность

Значительное место в тематике ОРХБ с конца 1950 годов отводилось исследованиям искусственной радиоактивности морской среды [8,14]. Особое место занимает радиоэкологический мониторинг после крупнейшей аварии на Чернобыльской АЭС, о чем сообщается ниже

[15]. В результате атмосферного переноса уже в первые дни после аварии на ЧАЭС, произошедшей ночью 26 апреля 1986 г., чернoбыльскiй след был обнаружен в прибрежных и открытых акваториях Черного моря. Основным из долгоживущих радионуклидов в радиоактивных выпадениях был ^{137}Cs . Радиоэкологические съемки в 1986 г. показали большую неоднородность распределения концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr в поверхностных водах. На акваторию Черного моря, по нашим расчетам, выпало около 1700-2400 ТБк ^{137}Cs и 300 ТБк ^{90}Sr . В последующие годы в результате гидрофизических и биогеохимических процессов прослеживались вертикальные миграции и поверхностные перераспределения радионуклидов. При этом выявлены существенные различия в интегральном содержании ^{137}Cs в слое 0-100 м в различных районах Черного моря, что явилось результатом неравномерности выпадений и влиянием гидрологических условий исследованных районов.

На протяжении 1986-1993 гг. прослежена роль Днепра и Дуная в формировании радиоактивного загрязнения северо-западной части Черного моря. Выявлена кондиционирующая роль каскада днепровских водохранилищ в отношении радионуклидов "чернобыльского происхождения" [12,32]. Определено, что за период 1986-1993 гг. с водами Днепра в Черное море поступило 70 ТБк ^{90}Sr (23% от атмосферного поступления) и 1,9 ТБк ^{137}Cs (0,1 % от атмосферного поступления). С водами Дуная в море поступило 20,9 ТБк ^{90}Sr и 21,4 ТБк ^{137}Cs (соответственно 7 и 1,3 % от атмосферного поступления).

Мониторинг в Севастопольских бухтах позволил проследить закономерности в динамике ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде, водорослях, моллюсках и рыбах. Результаты радиоэкологического мониторинга позволили выявить закономерности и тенденции региональных загрязнений после чернoбыльской аварии и оценить влияние мелкомасштабных гидрофизических и биологических факторов на перераспределение радионуклидов в Черном море.

Радиоизотопный и минеральный обмен

Исследования радиоизотопного и минерального обмена морских организмов велись с использованием экспериментальных наблюдений и с применением методов математического моделирования. Кинетические закономерности поглощения и выведения гидробионтами элементов различной биологической значимости изучались в опытах с радиоактивной меткой при изменяющихся абиотических и биотических параметрах среды. Для дифференциального описания минерального обмена гидробионтов использовались камерные модели, отражающие кинетические закономерности взаимодействия между живым веществом и химическими и радиоактивными компонентами морской среды по принципу протекания нулевого и первого порядков метаболических реакций. Адекватность разрабатываемой теоретической базы для балансового описания хемотрофических процессов в морской среде устанавливалась сравнением результатов опытов и природных наблюдений с данными численных экспериментов на моделях. Использование уравнений минерального обмена позволило построить теорию для описания взаимодействий в морских экосистемах с учетом баланса как по веществу и энергетическому эквиваленту биомассы, так и по минеральным элементам, в том числе и по загрязнителям водной среды. Исследование балансовыми методами акваторий, подверженных антропогенному воздействию [16], показало, что экосистемы фотического слоя обладают кондиционирующей способностью в отношении радиоактивных и химических загрязнений в результате генерирования потоков биоседиментационного и биотрансформационного самоочищения вод. Установлено, что при потоке загрязнения, превышающем предельный, равный уровню экологической емкости акватории в отношении рассматриваемого загрязнителя, система биотического самоочищения вод теряет устойчивость и функционирование экосистемы уже не в состоянии обеспечить кондиционирование водной среды.

Моделирование крупномасштабного загрязнения Черного моря

^{137}Cs и ^{90}Sr в результате аварии на Чернобыльской АЭС

С целью прогноза радиоактивного загрязнения Черного моря вследствие аварии на Чернобыльской АЭС была создана балансовая математическая модель, отражающая действие осредненных в крупномасштабном временном и пространственном представлении основных абиотических и биотических факторов на миграцию и время пребывания долгоживущих радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в Черном море [11, 12, 32]. Модель имела "научную" структуру (рис. 1), которая подразделяла Черное море на слои, между которыми осуществлялся водообмен, обмен аллохтонным и биогенным седиментационным материалом и связанными с этими процессами радионуклидами. Источником биогенного материала служила часть от первичной продукции фотического слоя. Предполагалось, что стационарность внутри каждого "ящика" наступает несоизмеримо быстрее, чем временные масштабы взаимодействия между "ящиками". Модель была замкнута по водному и солевому балансу, а также по радиоактивному загрязнителю среды. Модель реализовывалась численно методом Эйлера с эмпирическим подбором шага интегрирования.

На первом этапе с помощью уравнений модели были определены параметры вертикального водообмена в предположении о стационарности осредненного профиля солености в Черном море и в соответствии с существующими представлениями о водном балансе Черного моря. С полученными значениями вертикального водообмена проводилась проверка применимости модели для прогнозирования путем сопоставления результатов численных экспериментов и наблюдений повторов за распределением ^{137}Cs в Черном море после аварии на ЧАЭС, а также литературных данных. Модель с достаточной степенью адекватности отражала динамику вертикального переноса ^{137}Cs в период 1986-1989 гг. с учетом взаимодействия со смежными бассейнами и незначительного поступления с речным стоком.

Результаты численных экспериментов на более длительном интервале времени показали, что количество ^{137}Cs во всем объеме моря снижается экспоненциально и достигнет доаварийного уровня через 13 лет. Закономерность изменения содержания ^{137}Cs в слое 0-200 м имела также экспоненциальный характер с периодом уменьшения содержания в 2 раза в 12,5 лет. Закономерность для слоя 0-50 м имела двуэкспоненциальный характер с периодами уменьшения содержания в 2 и в 2,5 раза в 12,5 лет. Сопоставление полученных тенденций с литературными данными по изменению содержания ^{137}Cs в слоях 0-50 и 0-200 м в Черном море после прекращения испытаний ядерного оружия в период 1964-1977 годов показало, что и в этот период действие гидрофизических биогеохимических факторов привело к таким же темпам снижения содержания ^{137}Cs , которые были получены в результате численных экспериментов.

Распределение химических загрязнителей в водных экосистемах (ртути)

Исследования загрязнения Черного моря ртутью показали, что максимальные значения, превышающие предельно допустимую концентрацию ртути для морской воды, равную $100 \text{ нг} \cdot \text{л}^{-1}$, были отмечены в районах Днепро-Бугского лимана, Днестровской и Дунайской устьевых зон (рис. 2), а минимальные – в открытых акваториях Черного моря. Подсчитано, что в Черном море содержится около 14000 т ртути, в том числе в наиболее биологически активном слое 0-50 м находится 840 т. Годовое поступление ртути со стоком Дуная составляет 49-60 т, Днепра 3-5 т, а рек Кавказа – около 1 т. Свыше 50% поступающей в море ртути связано со взвешенным веществом. Обнаружено три пика в профилях вертикального распределения Hg в Черном море. Первый, на глубинах 20-30 м, обусловлен накопительной функцией обитающих в этом слое организмов планктонного комплекса. Второй, в слое 80-90 м, связан с косным взвешенным веществом, а третий, в интервале глубин 120-160 м, обусловлен трансформацией физико-химических форм ртути в

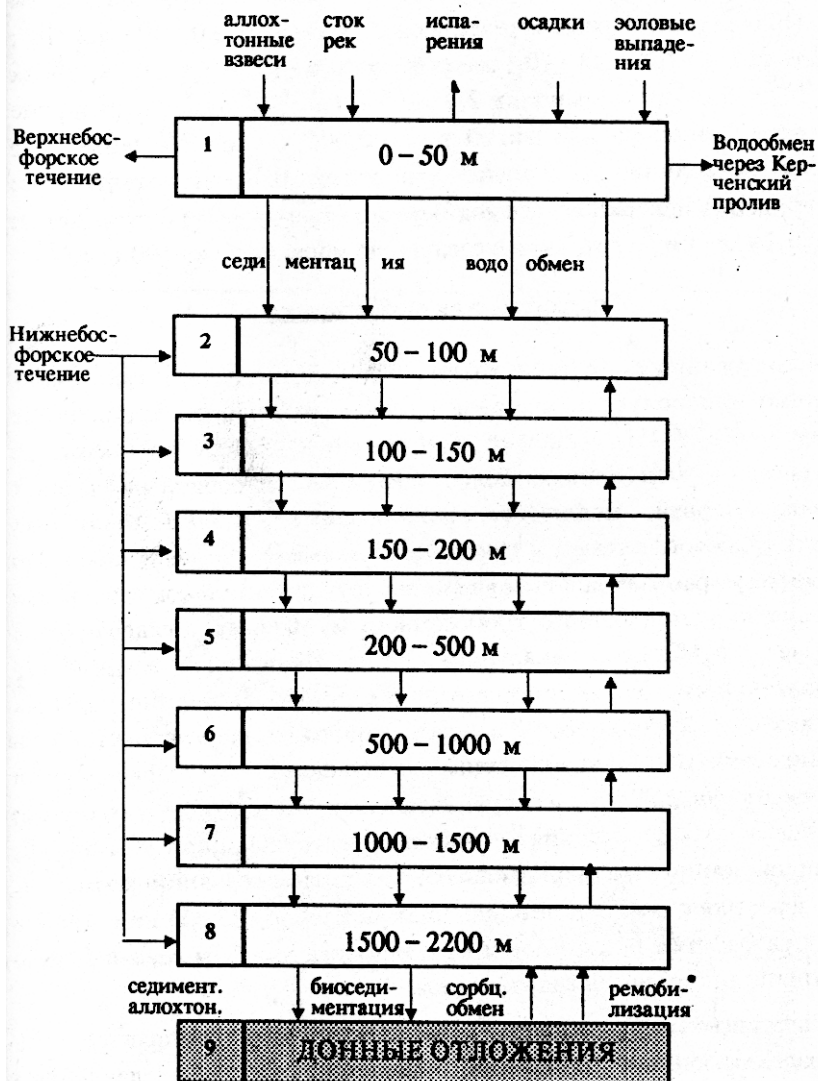


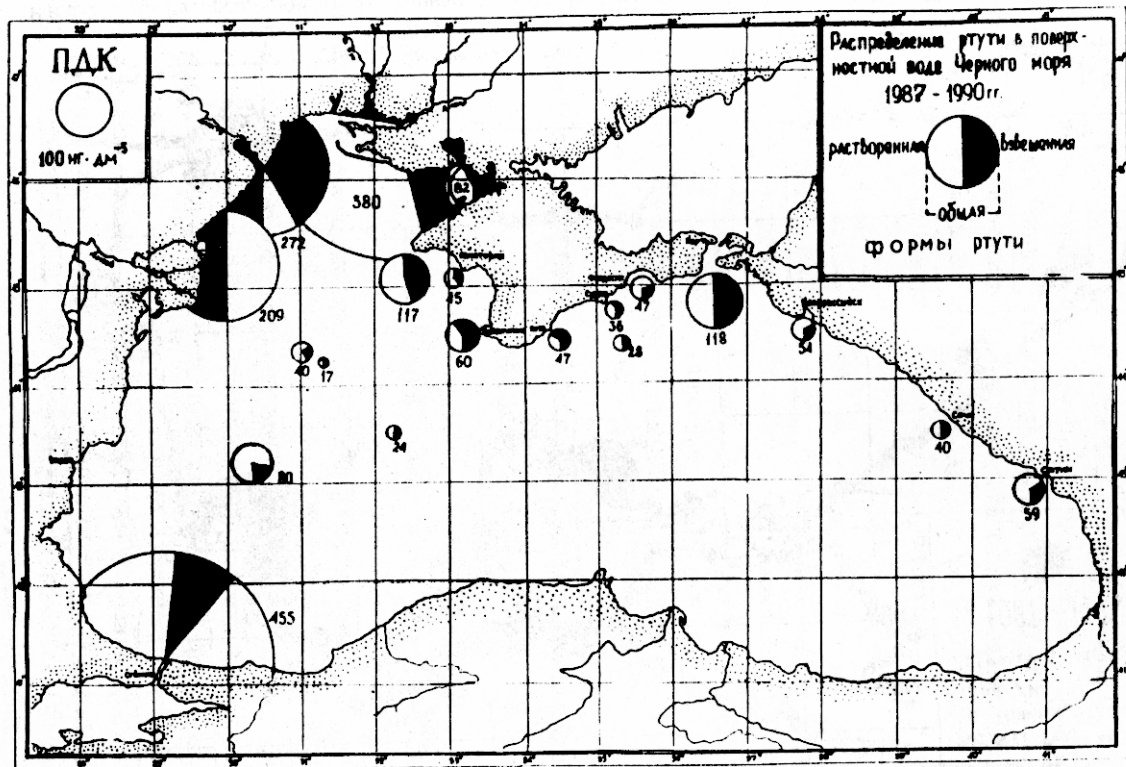
Рис.1 Структура модели вертикальной миграции долгоживущих радионуклидов

редокс зоне [21]. Анализ наблюдений показал, что зависимость изменения содержания ртути в гидробионтах от концентрации Hg в воде, как правило, описывается уравнением Ленгмюра. Коэффициенты накопления ртути в Черном море составляют: во взвешях $2,0 \cdot 10^4 - 6,2 \cdot 10^5$; планктоне $1,5 \cdot 10^3 - 2,3 \cdot 10^5$; макрофитах $0,6 \cdot 10^2 - 5,0 \cdot 10^3$; рыбах $1,9 \cdot 10^2 - 6,1 \cdot 10^3$ и мидиях $2,0 \cdot 10^2 - 1,5 \cdot 10^4$ единиц. Значение константы Ленгмюра для мидий равно $0,005 \text{ л} \cdot \text{нг}^{-1}$. Выполненные расчеты позволили заключить, что поток биоседиментационного самоочищения поверхностных вод Черного моря от ртути составляет не менее $0,24 \text{ кг} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ или в среднем по морю не ниже $100 \text{ т} \cdot \text{год}^{-1}$.

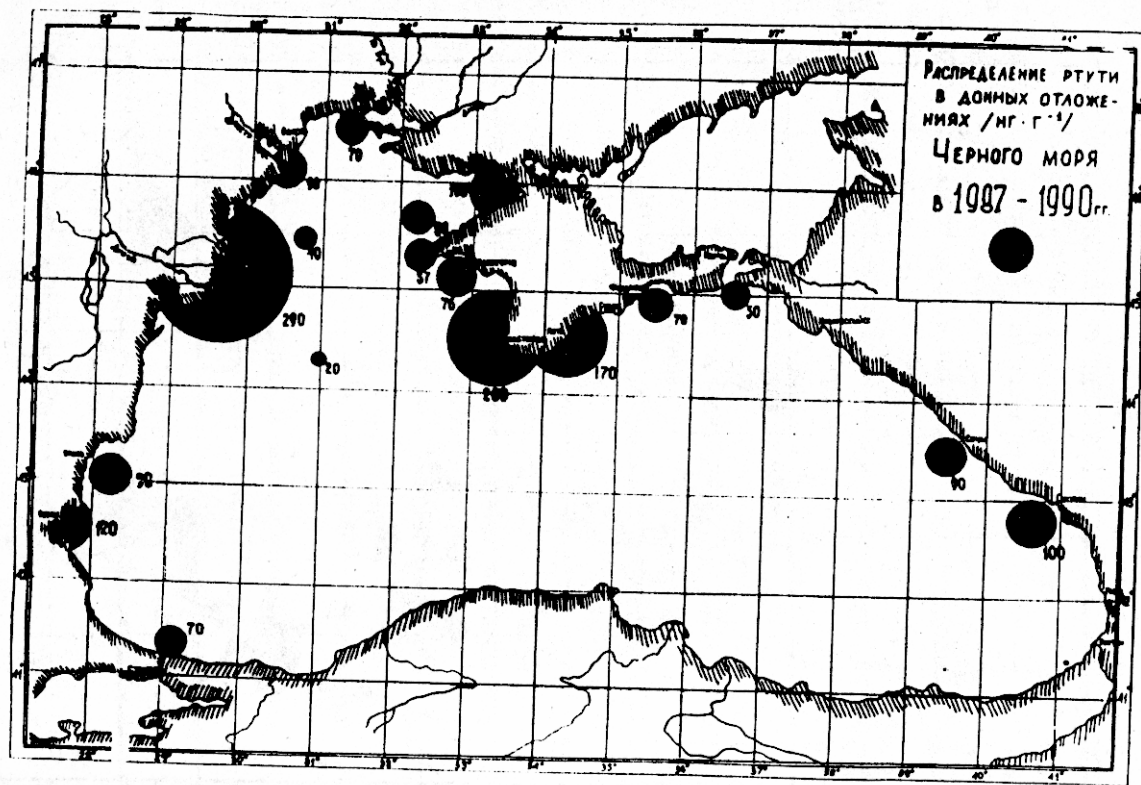
Экологическая цитогенетика

Исследования в области экологической цитогенетики гидробионтов позволили получить, начиная с 1960-х годов и, особенно, после аварии на ЧАЭС [33], данные об уровне и характере хромосомного мутагенеза в популяциях более 60 видов гидробионтов разных таксонов (червей, моллюсков, ракообразных, рыб) в различных районах Мирового океана, в том числе, в наименее загрязненных. Эти данные могут рассматриваться в качестве фундаментальной основы для изучения индуцированного хромосомного мутагенеза у гидробионтов как в районах локального антропогенного загрязнения (радиоактивного и химического), так и в экспериментальных условиях. Полученные закономерности естественного и индуцированного ионизирующим излучением и химическими мутагенами (*in situ* и в экспериментальных условиях) хромосомного мутагенеза — средняя частота структурных мутаций, внутривидовая вариабельность частоты aberrаций хромосом, типы перестроек и их клеточное распределение [25,33] положены в основу разработки принципов и методических приемов генетического мониторинга популяций гидробионтов.

Популяционный подход позволил вскрыть направленность микроэволюционных процессов, происходящих под давлением антропогенного воздействия. Показана возможность адаптации



Р и с. 2 а) Распределение ртути в поверхностной воде Черного моря 1987-1990 гг.



Р и с. 2 б) Распределение ртути в донных отложениях (нг · г⁻¹) Черного моря в 1987-1990 гг.

популяций гидробионтов с высоким адаптивным потенциалом, в основе которого лежат особенности жизненного цикла, к таким широко распространенным типам антропогенного воздействия, как коммунальные сточные воды и тепловое загрязнение [22,23]. На рис.3 показана адаптация популяций бокоплава *Gammarus olivii* к загрязнению биотопа коммунальными сточными водами. Обнаружено, что генетическая адаптация сопровождается ростом радиоустойчивости популяций как к внешнему, так и к инкорпорированному облучению [22,23,26].

Развитие исследований в этом направлении позволит прогнозировать генетические последствия радиационного и химического воздействия на популяции и сообщества, живущие в условиях антропогенного пресса, а также более точно оценивать экологическую емкость водоемов, т.е. способность экосистем выдерживать радиоактивное и химическое загрязнение водной среды, обеспечивая ее самоочищение.

Хемиобиологические процессы на границе аэробных и анаэробных зон Черного моря

Как известно, в Черном море, начиная с глубин 70-190 м., располагается сероводородная зона. Сам факт существования сероводорода в данном водоеме обусловлен плотностным расслоением глубинной и поверхностной водных масс. Установлено, однако, что его верхняя граница не совпадает с пикноклином, а располагается на несколько десятков метров ниже. Причины такого явления, т.е. механизмы стабилизации границы сероводорода изучаются нами с 1984 г. Проведен ряд экспедиций, причем в различные сезоны. Для исследования использовались радиоактивные индикаторы и микроэлектродная техника [5]. Измерения вертикального распределения и скорости бактериального хемосинтеза показали, что в большинстве случаев физиологически активные тионовые бактерии локализовались в трех зонах – субоксидной, редокс и верхней анаэробной. Под редокс-зоной в данном случае подразумевается слой

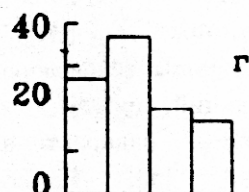
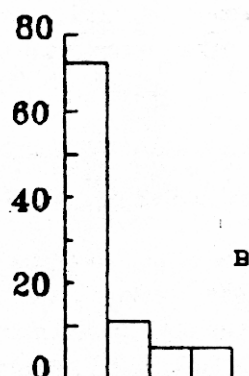
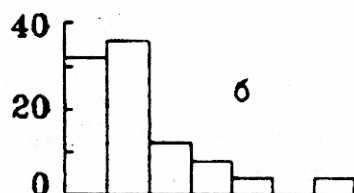
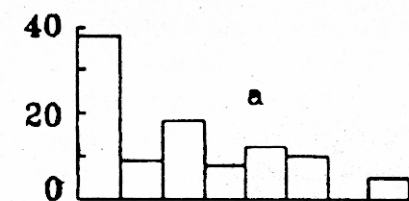


Рис.3 Динамика хромосомного мутагенеза в популяции *G. olivii* в районе сброса коммунальных сточных вод: а - через 6 лет, б - через 7,5 лет, в - через 8 лет и г - через 9 лет после начала функционирования стока. По оси абсцисс - % клеток с aberrациями хромосом, по оси ординат - количество особей, %.

сосуществования сероводорода и кислорода. Обнаружена корреляция профилей бактериального хемосинтеза и рН. Верхний, субоксидный слой хемотрофных бактерий имеет общие границы с зоной минимума рН, а нижние слои совпадают с отдельными пиками общего максимума рН, начинающегося сразу под границей сероводородной зоны (рис.4). Анализ полученных закономерностей показал, что бактериальное окисление сероводорода до сульфатов в Черном море может осуществляться поэтапно. В нижних слоях хемосинтеза происходит окисление наиболее восстановленных, т.е. богатых энергией форм серы – сульфидов и тиосульфата. При этом образуется элементная сера. В субоксидной зоне тионовые бактерии доокисляют серу до серной кислоты. Результаты исследований свидетельствуют, что хемоклин в Черном море имеет слоистую пространственную структуру. Его составными частями являются: субоксидная зона, слой сосуществования кислорода и сероводорода, а также часть анаэробной зоны. Сверху хемоклин ограничен горизонтом максимальных градиентов профиля солености, снизу – горизонтом проникновения доступных акцепторов электронов.

Исследования бактериального хемосинтеза в Черном море показали также, что этот хемоавтотрофный процесс характеризуется высокой биологической продуктивностью. Она составляет в настоящее время около $0,8 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$. Интересно сравнить эту величину с уровнем первичной продукции фитопланктона в фотической зоне открытой части Черного моря. Для этого были проанализированы все известные литературные данные по экспедициям 80-х годов. Оказалось, что первичная продукция в Черном море составляет в среднем $0,3 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$. Таким образом, бактериальный хемосинтез вносит весьма заметный вклад в общую продуктивность Черного моря.

Биологическое качество глубинных вод Черного моря

Качество глубинных вод из восстановительной зоны моря для оксибионтов явилось предметом изучения лишь в последнее время [1,7,9,13,19,20]. Предположение о вероятной токсичности таких вод

для морских организмов-обитателей окислительной зоны Черного моря были связаны с наличием в них как сероводорода, так и других химических веществ, которые в восстановительных условиях среды, в силу отсутствия в них гидробионтов, сохраняются в значительных количествах. К таковым относится, в частности,

марганец, содержание которого в глубинных водах этого моря, в среднем, на два порядка выше, чем на аналогичных глубинах в других морях и океанах (по данным Б.А. Скопинцева, 1975). Нами обнаружено [1,7,9,13,19,20], что основным токсикантом для черноморских одноклеточных водорослей в глубинной воде из восстановительной зоны Черного моря является сероводород. Изучение воздействия такой среды после окисления в ней сероводорода на одноклеточные водоросли представляет значительный интерес, так как они являются первичными продуцентами органического вещества в море.

При токсикологическом исследовании качества

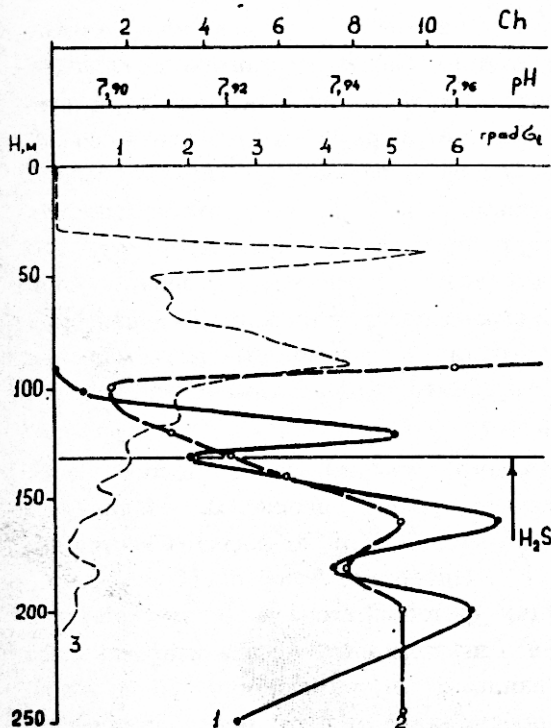


Рис.4 Профили скорости общего хемосинтеза — Ch(1), $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{сут.}^{-1}$; pH(2) и градиентов плотности водной среды — град·г(3). Координаты станции: 44°38' с.ш. 38°21'

окисленной глубинной воды из восстановительной зоны моря с использованием как тест-объектов планктонных водорослей были

использованы следующие показатели состояния их популяций – численность и темпы деления. Показано, что в течение первых 2-3 суток от начала экспериментов происходит адаптация водорослей к условиям среды. Достоверное различие в реакции водорослей на условия среды в полной мере начинает проявляться после этого периода адаптации [7,11,13].

В сравнительных экспериментах по изучению биогенных свойств окисленной водной среды из восстановительной зоны Черного моря и питательной среды Гольдберга было показано, что более высокие темпы деления и численность были определены в глубинной воде [19]. Для нее же была характерной и более высокая фототрофная активность водорослей [9]. Это обнаружено не только радиоуглеродным методом, но и методом замедленной флуоресценции [1]. Следовательно, окисленная вода, поднятая из восстановительной зоны Черного моря, обладает всеми биогенными свойствами, сформировавшимися в ней, которые позволяют оценить ее как перспективную среду для использования в комплексных марикультурных хозяйствах.

Так как зоны с восстановительными характеристиками существуют в различных районах Мирового океана, представило интерес сравнить биогенные свойства водных сред из ряда подобных регионов для фитопланктонных видов. Экспериментальные исследования такого плана для водной среды из Черного моря, Готландской котловины Балтийского моря и Бискайского залива показали [20], что наиболее эффективными средами для культивирования одноклеточных водорослей является аэрированная черноморская глубинная вода, а также вода из восстановительной зоны Балтийского моря (рис.5). Следовательно, при строгом соблюдении всех необходимых условий экологической безопасности на Черном море в принципе возможно применение высокоэффективных технологий типа "искусственный апвеллинг" из глубинных сероводородных слоев моря.

Хронология поверхностных слоев донных отложений
в анаэробной зоне Черного моря

Для определения возраста различных слоев поверхностных донных отложений глубоководной западной части Черного моря использован ^{137}Cs . С его помощью установлено, что скорость осадконакопления в этом районе составляет $0,42 \pm 0,14 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$, а поток взвешенного вещества – $69,8 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Это хорошо согласуется с оценками, выполненными ранее с помощью других методов [4,30,37]. Полученные данные позволили проанализировать хронологию поступления ^{137}Cs и высокотоксичных хлорорганических соединений (ПХБ, пестициды) в анаэробную зону Черного моря на протяжении всего периода присутствия этих загрязнителей в биосфере. Выделено три основные фазы поступления ^{137}Cs в глубоководные донные отложения западной части моря (рис. 6). Первые две соответствовали периодам наиболее активных испытаний ядерного оружия в атмосфере (1945-1959 и 1960-1963 гг), а третий – аварии на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 г. Максимальный поток ^{137}Cs ($14,1 \pm 3,1 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) соответствовал 1986 г. Эта величина, рассчитанная с помощью датирования донных отложений по ^{137}Cs , практически совпала с соответствующей оценкой, полученной в июне 1986 г в том же районе моря с помощью глубоководной седиментационной ловушки [36]. Аналогичный подход был использован для анализа хронологии поступления в Черное море стойких, практически не растворимых в воде хлорорганических соединений антропогенного происхождения – полихлорированных бифенилов (ПХБ) и высокотоксичных пестицидов: α – гексахлорциклогексана (α – ГХЦГ) и гептахлора. Наибольшее их поступление в глубоководные донные отложения происходило в 70-е годы. Затем поступление этих загрязнений заметно снизилось, что связано, по-видимому, с перекрытием основного русла Дуная плотиной "Железные Ворота" [35]. Данный материал был представлен на международном семинаре МАРИНА-МЕД [31].

ЧЕРНОЕ МОРЕ

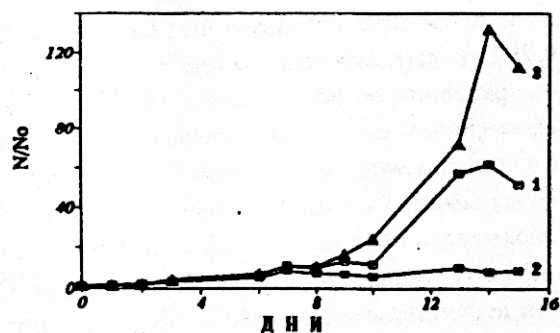
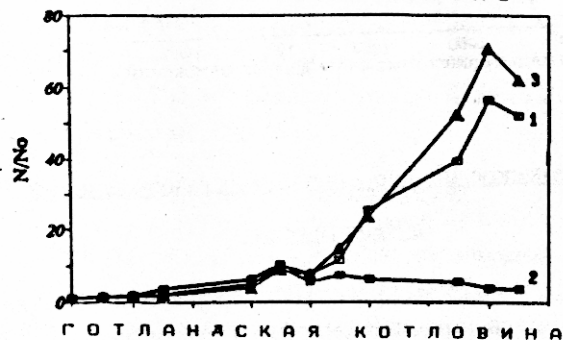


Рис.5 Сравнительный анализ влияния различных сред на культивирование одноклеточных водорослей. Обозначение: 1 – поверхностная вода, 2 – среда Гольдберга, 3 – глубинная вода; N – количество клеток в эксперименте, N_0 – исходное количество клеток.

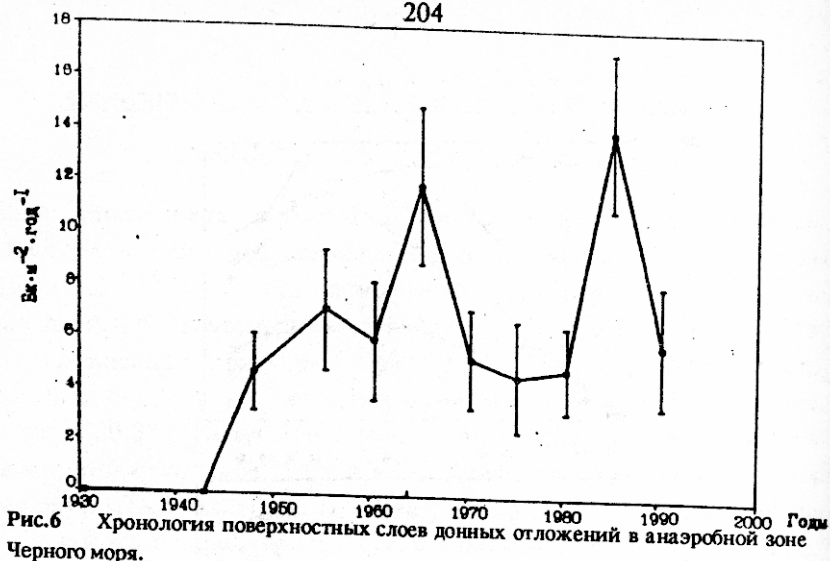


Рис.6 Хронология поверхностных слоев донных отложений в анаэробной зоне Черного моря.

Экологическое значение метановых газовыделений в Черном море

Весной 1989 г. в 28-м рейсе НИС "Профессор Водяницкий", сотрудниками отдела радиационной и химической биологии гидроакустическими методами были обнаружены газовыделения со дна Черного моря [3,6,29] (рис.7). Это послужило началом разработки нового научного направления – исследования средообразующей и экологической роли струйных метановых выделений в Черное море. Гидроакустические исследования с помощью гидроакустического комплекса "SIMPAD ЕК-400/ЕК-500" на частотах 38 и 120 кГц выявили наличие газовыделений на глубинах от 26 до 800 м на изломах дна или вершинах поднятий на свалах глубин Черного моря. Области расположения газовыделений располагались полями с масштабом от десятков метров до 2 км и были приурочены как к известным геологическим разломам дна моря, так и располагались вне их. Пузырьки газа поднимались к поверхности со скоростью $12-14 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$. На 60-80% пузырьки состояли из метана. Визуальные наблюдения

подводной управляемой видеокамерой "Минировер-МК-II" с подводной лодки "Бентос-300" показали, что в окислительной зоне Черного моря газовыделения как правило имели вид холодных сипов — пробулькивания метана через поры дна. В сероводородной зоне выделения метана происходили из карбонатных построек с бактериальными обрастаниями. По мере перехода от окислительной к восстановительной зонам Черного моря структура газовыделений менялась в соответствии с рис.8. Хемобиологические и экологические исследования показали, что в местах газовыделений в Черном море отмечается повышенное содержание метанооксиляющих бактерий в воде и наблюдаются изменения в структуре звукорассеивающих слоев, связанные как с их разрывом, так и сгущением. Расчеты показали, что для создания 1 м^3 карбонатных построек метанооксиляющие бактерии используют до 785 м^3 (при нормальном атмосферном давлении) или более полутонны метана [6].

Заключение

Работы отдела радиационной и химической биологии направлены на изучение взаимодействия между живым веществом и радиоактивными, а также химическими компонентами морской среды. Один из основных разделов исследований в этой области — изучение природной и искусственной радиоактивности гидробионтов, вод и донных отложений, химического загрязнения морской среды, определение хронологии и биологического действия загрязнений. Другое важное направление работ связано с эмпирическим изучением и математическим описанием кинетических закономерностей минерального обмена морских гидробионтов, оценкой роли биотических факторов в кондиционировании химического состава вод и разработкой прогнозов радиоактивного и химического загрязнения акваторий. И, наконец, важный комплекс работ последних лет направлен на изучение Черного моря как целостной окислительно-восстановительной системы, биогеохимические процессы в которой протекают на фоне многочисленных струйных метановых

Б

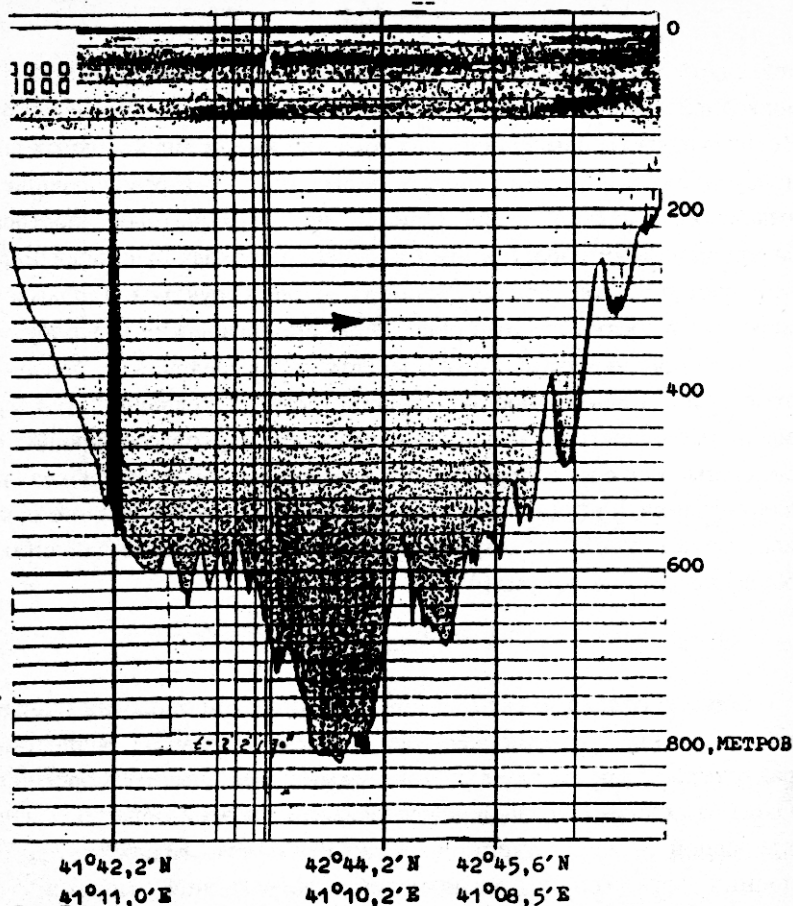


Рис.7 Эхограмма газовыделения в каньоне у побережья Кавказа. Стрелкой показано направление движения судна.

газовыделений из дна моря, открытых сотрудниками ИнБЮМ весной 1989 г.

Краткое и далеко неполное изложение основных, главным образом, новейших результатов, полученных сотрудниками отдела радиационной и химической биологии ИнБЮМ, свидетельствуют о том, что этот отдел, созданный при активной и доброжелательной поддержке директора СБС АН СССР и ИнБЮМ АН УССР члена-

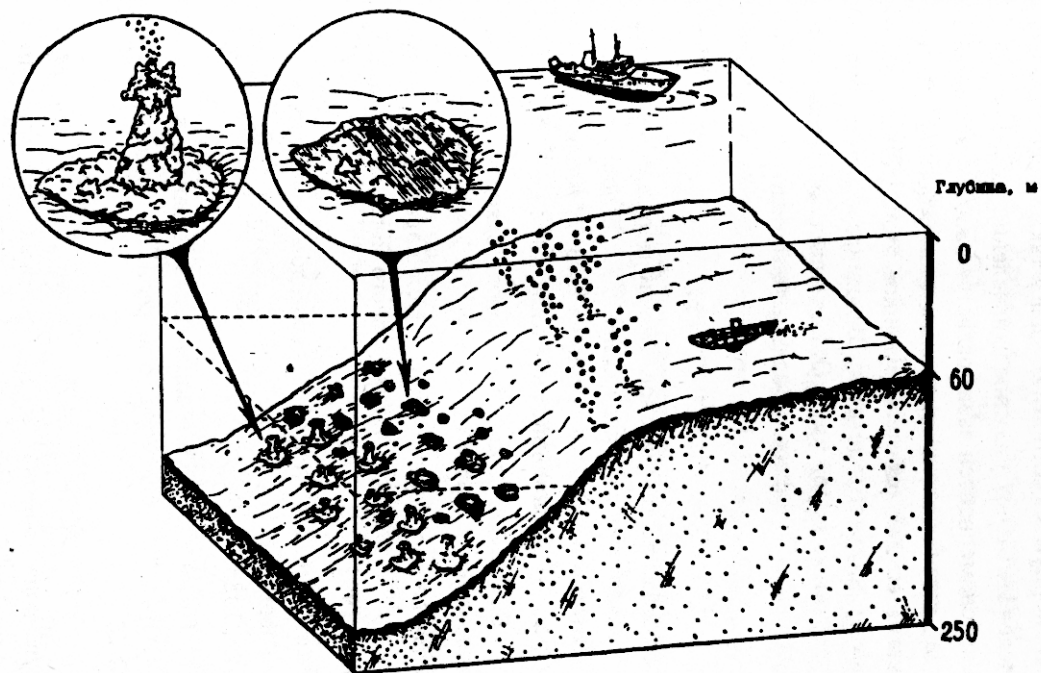


Рис.8 Вертикальное распределение основных морфологических типов газовыделений и бактериальных построек на свале глубин северо-западной части Черного моря.

корреспондента АН УССР проф. В.А. Водяницкого, существенно расширил тематику Института и обогатил его материально — радиобиологическим корпусом, который оказался также полезным для многих других отделов ИнБЮМ, а важное направление исследований в области изучения закономерностей взаимодействия живого вещества с радиоактивными и химическими компонентами морской среды, отраженное во многих сотнях работ сотрудников этого отдела, стало неотъемлемой частью научного детища Владимира Алексеевича — Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского с его научно-исследовательским судном "Профессор Водяницкий".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биогенные свойства глубинных вод Черного моря для некоторых массовых видов планктонных водорослей / Лазоренко Г.Е., Поликарпов Г.Г., Скотникова О.Г., Казимирко Ю.В. // Молисмология Черного моря, отв. ред. Г.Г. Поликарпова. — Киев, 1992. — С.37-50.
2. Водяницкий В.А. Допустим ли сброс отходов атомных производств в Черное море // Природа. — 1958. — N 2. — С.46-52
3. Газовыделения со дна Черного моря / Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б. и др. // Молисмология Черного моря, отв. ред. Г.Г. Поликарпова. — Киев, 1992. — С.5-10.
4. Геохимия литогенеза в условиях сероводородного заражения (Черное море) / Гавшин В.М., Лапухов С.В., Сараев С.В. и др. — Новосибирск: Наука, 1988. — 194 с.
5. Гулин М.Б., Гулин С.Б. Бактериальный хемосинтез в водной толще // Молисмология Черного моря, отв. ред. Г.Г. Поликарпов / Киев, 1992. — С.10-28.
6. Поликарпов Г.Г., Иванов М.В., Гулин С.Б., Гулин М.Б. Депонирование углерода метана в карбонатных бактериальных постройках на свале глубин сероводородной зоны Черного моря // Докл. АН Украины. Сер.Б. — 1993. — N7. — С.93-94.

7. *Ксенобиотические* и биогенные свойства водной среды восстановительной зоны Черного моря для морских водорослей / Поликарпов Г.Г., Лазоренко Г.Е., Терещенко Н.Н. и др. // Докл. АН Украины.— 1986.— №4.— С.76-79.

8. Кулебакина Л.Г., Поликарпов Г.Г. О радиоэкологии водорослей шельфа Черного моря / Океанология.— 1967.— 7, вып. 2.— С.279-286.

9. Лазоренко Г.Е., Гулин С.Б. Влияние водной среды из восстановительной зоны Черного моря на кинетику фототрофного обмена у планктонной диатомовой водоросли (*Bacillariophyta*) *Ditylum brightwellii* (West.) // Докл. АН Украины. Сер.Б.— 1987.— №12.— С.67-69.

10. Методы определения радиоактивности / Под ред. Г.Г. Поликарпова, В.П. Парчевского.— Киев: Наук. думка, 1972.— 196 с.

11. Молисмология Черного моря / Поликарпов Г.Г., Миронов О.Г., Егоров В.Н. и др.; Отв. ред. Поликарпов Г.Г.— Киев: Наук. думка, 1992.— 304 с.

12. Модель крупномасштабного загрязнения Черного моря долгоживущими радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr в результате аварии на Чернобыльской АЭС / Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Кулебакина Л.Г. и др. // Вод. ресурсы.— 1993.— №3.— С. 326-330.

13. Об отсутствии токсичности глубинной воды после удаления сероводорода / Поликарпов Г.Г., Веселова Т.В., Лазоренко Г.Е. и др. // Вестн. АН УССР.— 1986.— №2.— С.41-45.

14. Парчевский В.П. О радиоактивности некоторых организмов Черного моря / Радиоактивная загрязненность морей и океанов.— М.: 1964.— С.151-169.

15. Поликарпов Г.Г., Тимощук В.И., Кулебакина Л.Г. Концентрация ^{90}Sr в водной среде нижнего Днепра в направлении Черного моря // Докл. АН УССР. Сер.Б.— 1988.— №3.— С.71-73.

16. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н. Морская динамическая радиохемозология.— М.: Энергоатомиздат, 1986.— 176 с.

17. Поликарпов Г.Г. О способности морской водоросли *Ulva rigida* накапливать уран-238 из его равновесной смеси с торием-234 // Тр. Севастоп. биол. станции АН СССР.— 1960.— 13.— С.293-295.
18. Поликарпов Г.Г. Радиоэкология морских организмов. М.: Атомиздат, 1964.— 295 с.
19. Поликарпов Г.Г., Лазоренко Г.Е., Ланская Л.А. Реакция планктонных водорослей (*Bacillariophyta* и *Pirrophyta*) на водную среду из восстановительной зоны Черного моря // Докл. АН Украины. Сер.Б.— 1987.— №8.— С.73-75.
20. Поликарпов Г.Г., Лазоренко Г.Е., Гулин М.Б., Гулин С.Б. Сравнительное изучение биогенных свойств глубинных вод Черного моря, Балтийского моря (Готландской котловины) и Бискайского залива // Докл. АН Украины. Сер.Б.— 1993.— № 6.— С.167-170.
21. Трансформация физико-химических форм ртути и ее распределение в аэробной и анаэробной зонах Черного моря / Светашева С.К., Егоров В.Н., Гулин М.Б., Жерко Н.В. // Молисмология Черного моря, отв. ред. Г.Г. Поликарпов.— Киев: Наук. думка, 1992.— С.108-122.
22. Цыцугина В.Г. Адаптация природной популяции амфипод *Gammarus olivii*, к антропогенному загрязнению среды // Докл.АН СССР.— 1984.— 279, N5.— С.1270-1271.
23. Цыцугина В.Г. Влияние теплового загрязнения среды на радиочувствительность популяции бокоплавов // Радиобиология.— 1990.— 30, вып.5.— С.220-223.
24. Цыцугина В.Г., Рисик Н.С., Лазоренко Г.Е. Искусственные и естественные радионуклиды в жизни гидробионтов.— Киев: Наук. думка, 1973.— 152 с.
25. Цыцугина В.Г. Основные закономерности хромосомного мутагенеза в природных популяциях гидробионтов при антропогенном загрязнении среды // Вторая Всес. конф. по рыбохоз. токсикологии, посвящ. 100-летию проблемы качества воды в России (Санкт-Петербург, ноябрь, 1991): Тез. докл.— СПб., 1991.— 2.—С.246.

26. Цыцугина В.Г. Сравнительная радиочувствительность популяции амфипод *Gammarus olivii*, обитающих в разных экологических условиях // Радиобиология.— 1985.— 25, вып.6.— С. 812-815.

27. Экскузян З.М., Егоров В.Н., Курилова Н.В. Библиографический указатель работ ИнБЮМ АН УССР по проблеме "Радиационная и химическая биология" (1957-1972 гг.) / Под ред. Г.Г. Поликарпова.— Киев: Наук. думка, 1974.— 57 с.

28. Экскузян З.М. Библиографический указатель работ ИнБЮМ АН УССР по проблеме "Радиационная и химическая биология" (1957-1982 гг.) / Под ред. Г.Г. Поликарпова.— Севастополь: ИнБЮМ АН УССР, 1985.— 138 с.

29. Явление активного газовыделения из поднятий на свале глубин западной части Черного моря / Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Нежданов А.И. и др. // Докл. АН УССР. Сер.Б.— 1989.— N 12.— С.13-15.

30. Buesseler K.O., Benitez C.R. Deep Black Sea sedimentation rates: a comparison of several techniques over different time scales // Deep-Sea Research (in press).

31. Chronological study of ^{137}Cs , PCBs and some pesticides fluxes into the Western Black Sea deep sediments / Gulin S.B., Polikarpov G.G., Egorov V.N. et al. // MARINA-MED Seminar on the radioecological exposure of the population of the European Community from radioactivity in the Mediterranean Sea (Rome, Italy, 17-19 May, 1994): Preprint.— Rome, 1994.— 7 p.

32. Modelling Large-scale Contamination of the Black Sea Caused by Long-lived Radionuclides of Cs-137 and Sr-90 Following the Chernobyl Accident / Egorov V.N., Polikarpov G.G., Kulebakina L.G. et al. // Proceedings of Seminar on Compar. Assess. of the Envir. Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kyshtym, Wind-scale, Chernobyl. (Luxemburg, 1-5 October, 1990): Report EUR 13574.— Luxemburg, 1990.— P.649-664.

33. Polikarpov G.G., Tsytugina V.G. Effects of ionizing radiations on natural populations of aquatic organisms // IUR TF-5 Meeting (Budapest, 25-26 April, 1994): Preprint.- Budapest, 1994.— 24 p.

34. Polikarpov G.G. Radioecology of Aquatic Organisms.— Amsterdam.- N.Y.: North-Holland Publ.— Company: Reinhold Book Division.— 1966.— 314 p.

35. Popa A. Liquid and Sediment Input of the Danube River into the North-Western Black Sea // Transport of Carbon and Nutrients in Lakes and Estuaries.— Hamburg, 1993.— Part 6, SCOPE/UNEP Sunderland.— P.137-149.

36. Scavenging and particle deposition in the Southern Black Sea - evidence from Chernobyl radiotracers / Buesseler K.O., Livingston H.D., Honjo S. et al. // Deep-Sea Research.— 1990.— 37, N.3.— P.413-430.

37. Sediment deposition in the Late Holocene abyssal Black Sea with climatic and chronological implications / Hay B.J., Arthur M.A., Dean W.E. et al. // Deep-Sea Research.— 1991.— 38, suppl. 2.— P.1211-1236.

38. Whicker F.W., Schultz V. Radioecology II: Nuclear Energy and the Environment.— Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc.— 1982.— 1.— P.3-4.

Research in radiation and chemical biology conducted at IBSS in 1956-1994

V.G. Polikarpov, V.N. Egorov, L.G. Kulebakina, G.E. Lazorenko,

G.E. Tsytugina, N.S. Risik, S.B. Gulin, M.B. Gulin,

N.A. Stokozov, N.V. Zherko, S.K. Svetasheva

The reminiscences about personal contacts and work in collaboration with Prof. V.A. Vodyanitsky then the director of Sevastopol Biological Station, later IBSS, are presented. That was the time when first the laboratory and then the department of radiation and chemical biology was founded, reorganized and progressed. Main results of principal investigations initiated during V.A. Vodyanitsky lifetime and continued after his death are reported.