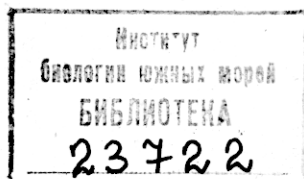


ПРОВ 98.

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР

Институт биологии южных морей
им. А.О. Ковалевского

ВОПРОСЫ ПРОДУКЦИОННОЙ, САНИТАРНОЙ
И ТЕХНИЧЕСКОЙ ГИДРОБИОЛОГИИ ЮЖНЫХ
МОРЕЙ



Издательство "Наукова думка"
Киев - 1971

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ МОРЕЙ СТОЧНЫМИ ВОДАМИ

Изучение процессов самоочищения моря от загрязнения следует отнести к числу фундаментальных проблем океанологии. На основе такой изученности могут быть разработаны научные основы охраны, использования и воспроизводства природных ресурсов, а также такие кардинальные вопросы, как допустимость сброса тех или иных отходов в море, предельные нагрузки морей сточными водами, возможность сброса с учетом и использованием благоприятных океанографических и гидробиологических факторов и т.д.

Основная цель нашей работы – исследование физико-океанографических и гидрохимических аспектов проблемы самоочищения моря от загрязнения и использование полученных результатов для разработки океанографических основ глубоководного сброса сточных вод в море.

В 1967–1970 гг. по этой теме осуществлен большой комплекс теоретических, экспериментальных и экспедиционных исследований. Некоторые трудоемкие расчеты выполнены при помощи ЭВМ в Одесском гидрометеорологическом институте. Работы выполнены в лаборатории гидрологии. В исследованиях по этой теме принимали участие: В.И.Зац (руководитель), Е.Ф.Шульгина, М.С.Немировский, Б.Ф.Андрюшенко, В.В.Кандыбо, В.Н.Степанов.

Под самоочищением моря от загрязнения мы понимаем весь комплекс факторов, влияющих на уменьшение концентрации загрязняющих примесей, а именно: 1) физико-океанографических, 2) гидробиологических, 3) физико-химических. [9]. В море все эти процессы действуют одновременно, но вклад каждого изучен крайне недостаточно.

Основная модель, на которой базируются все методы расчета и прогноза процессов, уменьшающих концентрации загрязняющих примесей в море – это модель турбулентной

диффузии неконсервативной примеси. На основе этой модели можно учитывать как гидромеханические факторы (перенос течения и процессы турбулентной диффузии), так и факторы неконсервативности примеси (скорость отмирания инородной бактериофлоры, интенсивность минерализации и т.д.).

На рис. 1 показана в общих чертах принципиальная схема изучения основных факторов процессов самоочищения. В рамках этой комплексной проблемы объектами исследований были турбулентная диффузия инородных примесей, перенос, процессы минерализации нестойкого органического вещества бытовых сточных вод, т.е. такие факторы, которые оказывают наибольшее влияние на судьбу сточных вод.

Исследования горизонтальной турбулентной диффузии прямыми методами позволили выявить некоторые важные закономерности, характеризующие интенсивность горизонтального перемешивания и разбавления инородных примесей в море. На их основе представляется возможным определить зоны с максимальной интенсивностью горизонтального смешения в пространственном масштабе, выбрать обоснованные исходные данные при решении уравнений турбулентной диффузии примесей, оценить роль физико-океанографических факторов в уменьшении концентрации загрязняющих веществ, сопоставить результаты экспериментальных исследований с некоторыми теоретическими и полуэмпирическими моделями.

1. В течение 1964-1970 гг. у приглубых побережий Черного моря проводилось изучение "ричардсоновской диффузии" (диффузия дискретных плавающих индикаторов) на поверхности моря. Это позволило определить величины коэффициентов горизонтальной диффузии K и их зависимость от масштабов явления (l) для процессов малого и среднего масштабов с пространственными размерами соответственно 100-1000 м и 1-10 км. Зависимость K от l аппроксимируется степенной функцией $K \sim l^n$, где n изменяется от 0 до $4/3$. Показатель n для условий приглубой прибрежной зоны чаще всего меньше, чем в "законе $4/3$ ", однако величина n для среднемасштабных процессов возрастает в 1,5-2,0 раза по сравнению с явлениями малого масштаба (рис. 2). Для приглубых побережий отмечаются существенные отклонения от "закона $4/3$ ". Удалось показать характер

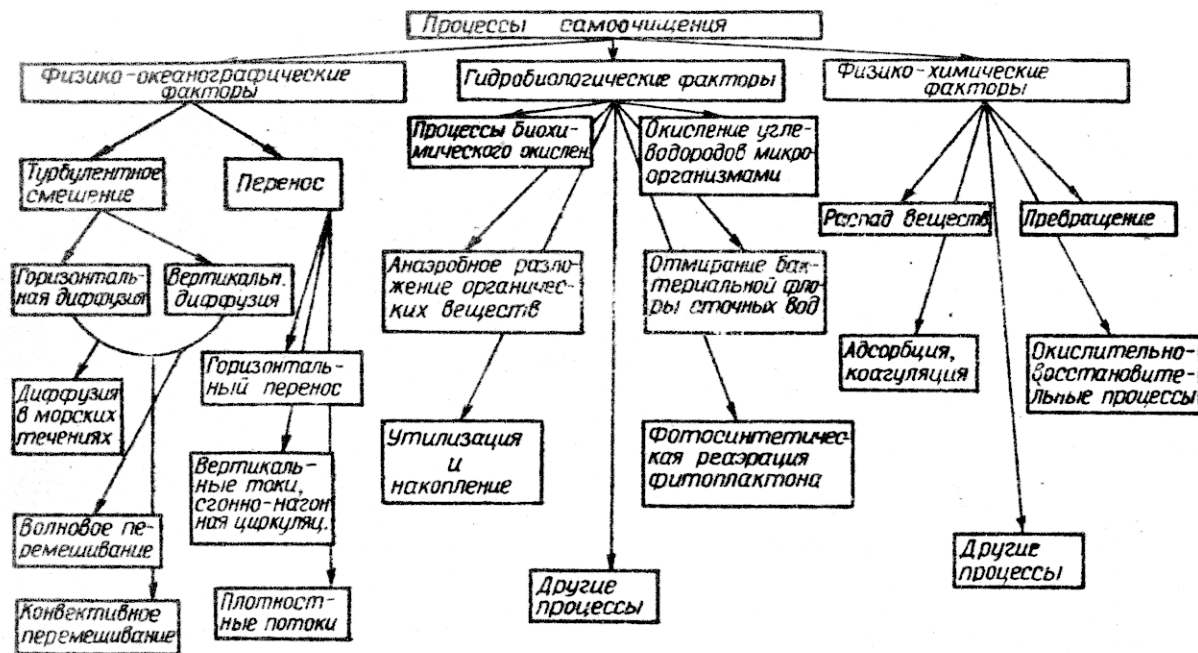


Рис. 1. Схема основных факторов, участвующих в процессах самоочищения моря от загрязнения.

зависимости коэффициентов K от скоростей течений, которая в общем виде аппроксимируется степенной функцией $K(V) \sim V^m$ [1, 2, 7], и от плотностной стратификации вод. Связь между коэффициентами K и плотностной стратификацией обнаружена при течениях 20–30 см/сек и больше. Для большинства таких случаев горизонтальная диффузия уменьшается по мере утолщения верхнего однородного слоя, т.е. с ослаблением стратификации (рис. 3). Таким образом, впервые эксперименты по "ричардсоновской диффузии" подтвердили (в первом приближении) соображения Парра и Р.В.Озмидова [10] о том, что в стратифицированной среде горизонтальный обмен должен возрастать по сравнению с условиями однородной среды [8].

Удалось оценить такие параметры горизонтальной диффузии как: 1) степень расширения потока частиц от линейного источника непрерывного действия в зависимости от показателя n и 2) степень относительного расширения диффундирующего нестационарного пятна в зависимости от n [1, 3].

Изучение "ричардсоновской диффузии" дает возможность получить объективные и достоверные представления о показателе степени n , характеризующем интенсивность горизонтальной диффузии для различных определяющих факторов.

Использование постоянных величин коэффициентов диффузии или "закона 4/3" чаще всего не отражает реальных ситуаций и приводит к ошибочным результатам. На основе знания тех или иных моделей задания функции $K(l)$ и $K(V)$ по данным экспериментальных исследований можно решать уравнения турбулентной диффузии от различных типов источников.

Такие расчеты на основе изучения "ричардсоновской диффузии" в районе Ялты, м.Пицунды, Туапсе и других пунктах проведены при исследовании оптимальных параметров глубоководного сброса сточных вод в море. Полученные модели зависимости $K(l) \sim l^n$ по наблюдениям при различных динамических режимах в прибрежной зоне приняты в качестве исходных при решении уравнений турбулентной диффузии и оценке степени горизонтального разбавления.

Помимо такого подхода использованы и другие пути изучения процессов турбулентного перемешивания в море.

2. На основе статистических методов изучения турбулентного обмена выполнены расчеты (на ЭВМ "Минск-22") коэффициентов перемешивания по пульсациям скоростей течений. Они показали четкую зависимость коэффициентов обмена от периода осреднения для различных динамических режимов вод [7]. Это дало возможность рекомендовать оптимальные интервалы регистрации течений (5-10 мин) и интервалы осреднения при статистической обработке материалов (до 3-4 час) при изучении коэффициентов обмена малого и среднего масштаба явления. Анализ материалов выявил характерный рост коэффициентов обмена с удалением от берега (у приглубых побережий). Обнаружено, что в промежуточных слоях у свала глубин (переход от шельфа к склону) наблюдается максимальный обмен количеством движения, а значит и максимальное перемешивание вод.

Специальные исследования горизонтального обмена в тонком придонном слое 0,5-1,0 м от дна в зоне свала глубин показали, что обмен ослабевает у дна на два-три порядка по сравнению с поверхностным и промежуточным слоями.

Такое зондирование всей толщи вод позволяет выявить зоны с максимальным горизонтальным перемешиванием, что имеет важное значение при выборе оптимальных условий глубоководного и сверхдальнего сброса.

3. Весьма перспективным является изучение процессов турбулентной диффузии в рамках натурного моделирования. Оно предполагает создание в море источников искусственной (консервативной) примеси, мгновенных или стационарных, для изучения трансформации (рассеяния, расширения, смешения) пятен и струй примеси.

В этом направлении впервые в нашей стране выполнены исследования горизонтальной диффузии пятен красителей при помощи аэрофотосъемки. По масштабу образованных пятен, точности имитации "точечного мгновенного" источника, комплексу совместных с аэрофотосъемкой других диффузионных опытов наши эксперименты позволяют получить весьма ценную информацию об этих процессах.

Изучение процессов горизонтальной диффузии нестациона-

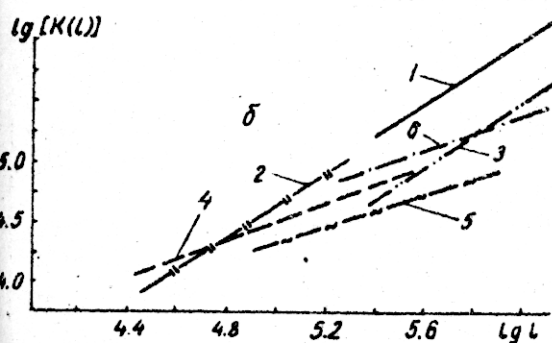
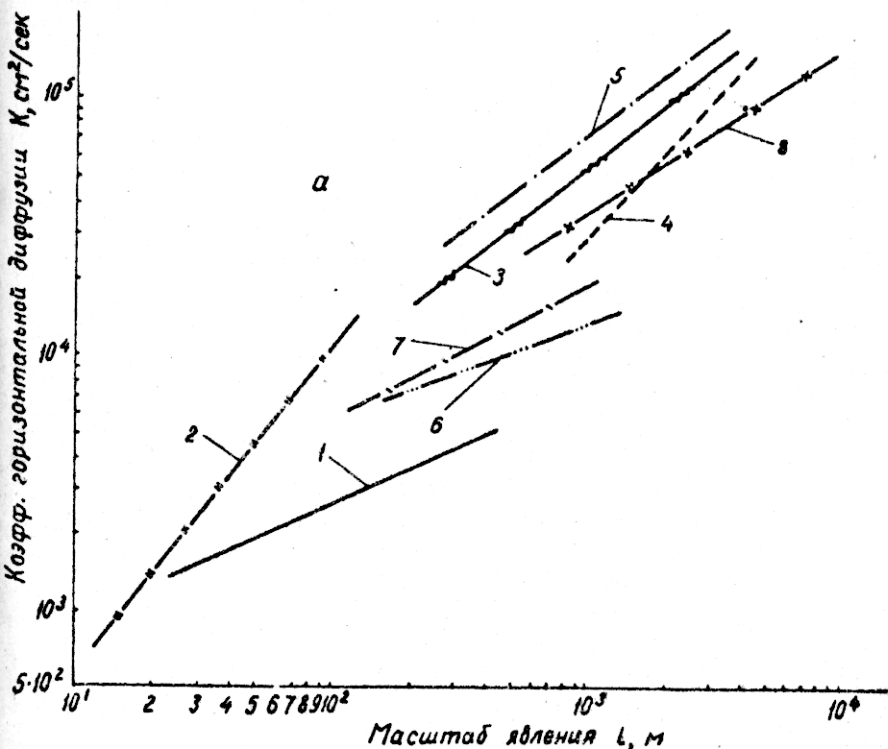


Рис. 2. Зависимость коэффициентов горизонтальной диффузии K от масштаба явления L ; а — по данным экспериментов у приглубых побережий Черного моря: 1, 2, 6–8 — район

Ялты, 3 — м. Пицунда, 4 — Туапсе, 5 — Поти; б — графики функции $K(L)$ для процессов среднего масштаба по данным наших экспериментов и других авторов: 1, 2, 3 — в открытом океане по данным Немченко (1964), Озмидова (1968); 4, 5, 6 — результаты наших исследований в Черном море соответственно в районе м. Пицунды, Ялты и Туапсе.

нарных пятен красителей в море позволило установить, что изменчивость площадей диффундирующих пятен (S) во времени (t) аппроксимируется степенной функцией $S \sim t^{\lambda}$, где показатель степени λ изменяется в пределах 0,63 – 1,92. Зависимость радиусов пятен (эквивалентных площадям круга) от времени описывается для большинства опытов линейной функцией. Удалось определить скорость диффузии P , которая имеет порядок величины 0,5–1 см/сек. По материалам аэрофотосъемки выполнены расчеты коэффициентов горизонтальной диффузии, которые оказались в пределах $10^3 - 10^4$ см²/сек, что хорошо согласуется по порядку величины с коэффициентами, вычисленными по методу Ричардсона для масштабов явления до 1000 м [1, 4, 7, 13].

Процесс диффузии пятен является анизотропным; коэффициенты диффузии в пятнах вдоль потока на порядок величины больше коэффициентов поперек потока. Параметры, определяющие кинематику пятен (S, R, t, λ) удалось интерпретировать в рамках теоретической модели турбулентной диффузии от точечного источника.

4. В рамках натурального моделирования проведены эксперименты по изучению интенсивности начального и горизонтального разбавления пятен и струй (от точечных источников) флюоресцирующих красителей при помощи люминесцентных методов. При помощи буксируемого флюориметра удалось установить некоторые закономерности по распределению концентрации красителей в пятнах и струях. Этот метод позволяет изучать процессы диффузии как на поверхности моря, так и в глубинных слоях.

Съемки пятен по распределению концентрации красителей в последовательные моменты времени показали характер падения максимальной концентрации во времени, которое аппроксимируется степенной функцией $C_{max} \sim t^{-k}$, где k изменяется в пределах 1,04–2,21. Изменчивость максимальных концентраций C_{max} в потоках от стационарных источников с удалением от источника (X) описывается функцией $C_{max} \sim X^{-z}$, где z изменяется в пределах 0,62–2,5.

При помощи буксируемого флюориметра проведены эксперименты по изучению начального и горизонтального раз-

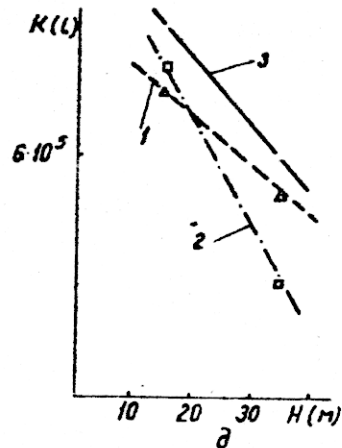
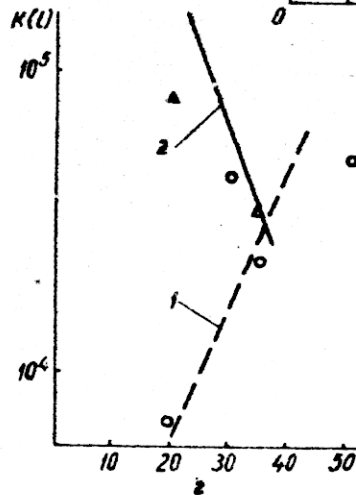
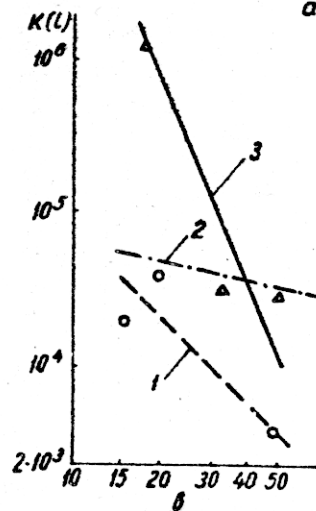
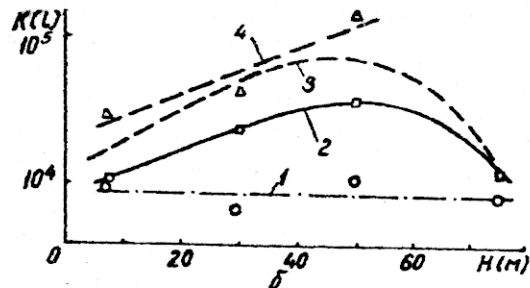
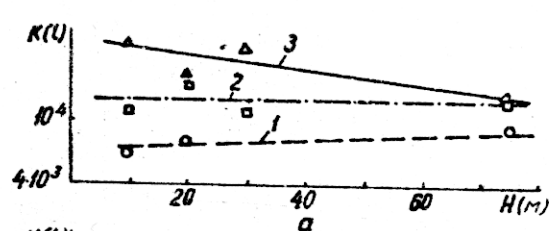
бавления у действующих выпусков сточных вод. Сравнение фактических измерений начального разбавления (при вертикальном подъеме всплывающей струи) с полуэмпирическими методами показало, что последние занижают величины начального разбавления по крайней мере на порядок величины.

На основе анализа эффективности работы существующих выпусков сточных вод, а также по данным специальных опытов по моделированию потоков при помощи красителей и буксируемых флюориметров можно разрабатывать оптимальные пути удаления сточных вод в море для достижения максимальной степени смешения и разбавления. Эти результаты использованы при разработке оптимальных условий глубоководного сброса сточных вод с целью устранения загрязнения прибрежной зоны.

Проведенные исследования позволяют определить некоторые важные параметры горизонтальной диффузии инородных примесей: а) параметры, определяющие кинематику и динамику пятен или потоков, — изменчивость размеров пятен и струй и др.; б) параметры, характеризующие изменение концентрации загрязнения в пятнах и потоках, во времени и пространстве; в) параметры, характеризующие кратность или степень разбавления при вертикальных подъемах струи, горизонтальном ее распространении и др.

Полученные закономерности по диффузии пятен инородных примесей в море могут быть использованы не только для изучения диффузии полей загрязненных вод, но и для оценки роли гидромеханических факторов в "растаскивании" и рассеивании пятен планктона, пятен биогенов и так далее в познании механизма "пятнистости", что представляет большой интерес в гидробиологии.

5. Изучение поведения всплывающих струй в условиях плотностной стратификации вод в неподвижной среде и при наличии течений позволило оценить влияние течений на высоту подъема легких струй. Такая оценка выполнена впервые для условий морских водоемов и может использоваться при практических расчетах глубоководного сброса сточных вод [5, 11]. Плотностная стратификация вод практически уже может быть использована для заглубления потоков сточных вод в тех слоях, где создаются наилучшие условия распространения, перемешивания и разбавления.



6. Помимо физико-океанографических факторов большое влияние на поведение и трансформацию поля сточных вод оказывают процессы биохимического окисления нестойкого органического вещества этих вод. Гидрохимические аспекты этого сложного и многогранного процесса дают возможность оценить вклад минерализации в превращении веществ и, следовательно, в самоочищении моря.

Проведенные под руководством Е.Ф.Шульгиной исследования биохимического окисления и нитрификации неконсервативного органического вещества, играющие важнейшую роль в самоочищении моря от загрязнения, показали следующее [12]:

а) по данным лабораторных экспериментов получена серия кривых БПК, характеризующая степень биохимического окисления в зависимости от таких определяющих факторов, как температура и концентрация легкой органики в пробе. Расчет констант скорости окисления и полного биохимического потребления кислорода показал, что диапазон изменений констант находится в пределах 0,08–0,26;

б) установлено, что при температуре эксклюзии 20–25° С на пятые сутки минерализуется не менее 80% свежей органики, при константах скорости окисления 0,26–0,85%.

Между минерализацией, выраженной в процентах, и константами скорости окисления выявляется четкая связь. Расчеты показали, что при 20°С процессы минерализации в морской воде проходят несколько медленнее, чем в речной;

в) продолжительность первой фазы окисления БПК также зависит от температуры и концентрации загрязняющих

Рис. 3. Зависимость коэффициентов горизонтальной диффузии K от толщины верхнего однородного слоя H для определенных градаций скоростей течений V и масштабов явления l : а – $V=0-10$ см/сек; б – $V=10-20$ см/сек; в – $V=20-30$ см/сек; г – $V=30-40$ см/сек; д – $V=40-50$ см/сек. Для а, б, в масштаб явления l : 1 – 0 – 500 м, 2 – 500 – 1000 м; 3 – 1000 – 1500 м; 4 – 1500 – 2000 м; для г и д – 1 – 0 – 1000 м; 2 – 1000 – 2000 м; 3 – 2000 – 3000 м.

примесей. Расчет количества кислорода, расходуемого на образование нитритных и нитратных форм азота, показывает четкую обратную связь между кислородом и концентрацией минеральных форм азота;

г) анализ гидрохимических показателей, могущих служить индикаторами загрязнения акватории моря хозяйственными сточными водами, говорит о том, что кислород, присутствующий в верхних слоях моря всегда в достаточном количестве (не менее 70%), не может служить показателем степени чистоты морских вод. Хлорность, биогены могут являться индикаторами только с учетом полного комплекса факторов, влияющих на динамику указанных компонентов;

д) сравнительные гидрохимические исследования в зонах распространения бытовых сточных вод (по окрашенной струе) и в прилегающих чистых акваториях моря дают возможность оценить ареал загрязненных вод по гидрохимическим показателям и изменчивость этих показателей в струе по мере удаления от источника загрязнения.

Дальнейшие исследования в этом направлении помогут раскрыть закономерности превращения веществ в загрязненных водах и перейти к количественным связям для оценки вклада минерализации в процессах самоочищения моря.

7. На основе физико-океанографических и гидрохимических исследований обоснована возможность, сформулированы основные принципы и изучены океанографические условия глубоководного и сверхдальнего сброса некоторых типов сточных вод для эффективного устранения загрязнения прибрежной зоны и шельфа Черного моря [6, 9]. Проблема глубоководного сброса трактуется как один из методов рационального удаления частично или полностью очищенных сточных вод [2, 3], который в определенных условиях является наиболее целесообразным (например, сброс хозяйственных сточных вод без включения промстоков, наличие благоприятных океанографических факторов и т.д.).

Для определения основных параметров глубоководного сброса сточных вод в районах Ялты, Туапсе и у м.Пицунда проведены комплексные исследования физико-океанографи-

ческого, гидрохимического и гидробиологического режимов^{х/} в зонах предполагаемого сброса. Оптимальные условия глубоководного сброса разработаны с учетом необходимости как санитарной охраны прибрежной зоны водопользования, так и охраны рыбохозяйственной ценности района предполагаемого выпуска.

Указанные работы оказали большую помощь народному хозяйству, экономическая эффективность от внедрения разработанных рекомендаций весьма существенна, а главное удастся устранить загрязнение прибрежной зоны водопользования и шельфа Черного моря. А результаты оздоровления прибрежной зоны Ялтинского и Пицундского курортов, шельфа района Туапсе и устранение их загрязненности вообще трудно поддаются оценке (в рублях).

Дальнейшие исследования в этом направлении весьма перспективны. Основное внимание должно быть уделено изучению теоретических основ проблемы самоочищения моря от загрязнения. Естественно, что конечной целью является разработка комплексной теории самоочищения моря от загрязнения и развитие на ее основе прикладных исследований по охране морей от загрязнения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. ЗАЦ В.И.-В сб.: Гидрофиз. и гидрохим.исслед.в Черном море. М., "Наука", 1967а.
2. ЗАЦ В.И.-В сб.: Вопросы биоокеанографии. Киев, "Наукова думка", 1967б.
3. ЗАЦ В.И.-В сб.: Динамика вод и вопросы гидрохимии Черного моря. Киев, "Наукова думка", 1967в.
4. ЗАЦ В.И., АНДРЮЩЕНКО Б.Ф. Материалы III Всесоюзн. симпозиума по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод, ч.2, Москва-Таллин [Изд-во Таллин. политехнич.ин-та], 1969.
5. ЗАЦ В.И., СТЕПАНОВ В.Н. Материалы III Всесоюзн. симпоз.по вопросам самоочищения водоемов и смешения

^{х/} В этом разделе работ принимали участие М.И.Киселева (отдел бентоса) и Л.В.Сенечкина (лаборатория фито-планктона).

сточных вод, ч.2. Москва-Таллин [Изд-во Таллинн.поли-технич.ин-та], 1969.

6. ЗАЦ В.И.-В сб.: Океанограф.аспекты самоочищения моря от загрязнения. Материалы научной конференции. Киев, "Наукова думка", 1970а.
7. ЗАЦ В.И.-В сб.: Океанограф.аспекты самоочищения моря от загрязнения. Материалы научной конференции. Киев, "Наукова думка", 1970б.
8. ЗАЦ В.И. Симпозиум по стратифицированным течениям, АН СССР, Тезисы докладов. Новосибирск [Изд-во ин-та гидродинамики СО АН СССР], 1970в.
9. ЗАЦ В.И.-В сб.: Проблемы морской биологии. Киев, "Наукова думка", 1971.
10. ОЗМИДОВ Р.В. Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане. М., "Наука", 1968.
11. СТЕПАНОВ В.Н. Материалы III Всесоюзн.симп.по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод, ч. 2. Москва-Таллин [Изд-во Таллин.политехнич.ин-та], 1969.
12. ШУЛЬГИНА Е.Ф.-В сб.: Океанографич.аспекты самоочищения моря от загрязнения. Киев, "Наукова думка", 1970.
13. ZATS V.I. *Experimental studies of Horizontal diffusion in the Black sea coastal zone. FAO Technical conf. on marine pollution and its effects on living resources and fishing. Rome. 1970.*