

551.46:628.394
3-389



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ им. А. О. КОВАЛЕВСКОГО

В. И. ЗАЦ, Л. Д. РОЗМАН, Е. А. КУФТАРКОВА

ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИГЛУБЫХ ШЕЛЬФОВ КРЫМА И КАВКАЗА

Препринт

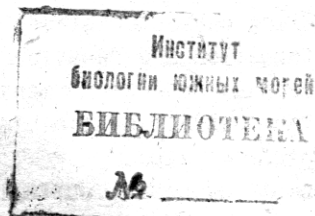
СЕВАСТОПОЛЬ, 1994

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ им. А. О. КОВАЛЕВСКОГО

В. И. ЗАЦ, Л. Д. РОЗМАН, Е. А. КУФТАРКОВА

ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИГЛУБЫХ ШЕЛЬФОВ КРЫМА И КАВКАЗА

Препринт



СЕВАСТОПОЛЬ, 1994

Работа посвящена обобщению публикации авторов по исследованию состояния загрязненности акватории приглубых шельфов Крыма и Кавказа, по изучению процессов переноса и перемешивания, обоснованию подходов по ослаблению и устранению загрязнения этих акваторий. В работе в сжатом виде представлены основные результаты исследования авторов и других исследователей по указанным вопросам.

Представлены количественные и качественные оценки поступления загрязненных вод, основные характеристики адвективного переноса и перемешивания, оказывающие влияние на поведение полей загрязненных вод в море, обоснована необходимость использования природных ресурсов шельфовой зоны для оптимального пространственного расположения глубоководных выпусков очищенных сточных вод.

The report "Oceanographic and Hydrochemical aspects of the problem of pollution of the Crimea and Caucas narrow deep-sea shelves" is concerned with generalization of authors publications on the investigation of pollution situation in this water area, on the transport and mixing processes and on the investigation of approaches to decrease anthropogenic press in this zone.

The quantitative and qualitative estimation of sewage and polluted water (which input to the sea), the advective transport and mixing characteristics, having the greatest influence on the formation and behaviour of polluted water fields, the approaches on using many favorable natural processes for optimum outfall spatial location in deep-sea shelves are presented.

Investigation of deep-sea outfall efficiency in Yalta region has shown that the optimum spatial location of deep-sea outfalls of purified sewage in the narrow deep-sea shelves of the Black Sea can considerably decrease and minimize the negative effects experienced by the coastal zone.

Приглубые шельфы у побережий Крыма и Кавказа характеризуются как специфические акватории Черного моря. Изобаты 100-200 м и свал глубин располагаются вблизи берега (обычно в 5-10 милях, в отдельных районах в 15-20 милях от берега). Основной поток черноморских течений (ОЧТ) проходит вблизи свала глубин, а между ним и берегом часто формируются вихревые образования. Эффект "приглубости" существенно влияет на термохалинную структуру и динамику вод.

Указанные шельфы подвергаются интенсивному загрязнению за счет поступления сточных вод с суши и адвекции загрязненных вод из соседних акваторий. Между тем, здесь располагаются приморские города и крупные курортные центры (Большая Ялта, Алушта, Судак-Планерское, Большие Сочи и др.). Сброс сточных вод в прибрежную зону наносит огромный вред ее рекреационным ресурсам, так как он сопровождается интенсивным химическим и бактериологическим загрязнением морских вод.

Основная цель работы - обобщить в сжатом виде результаты наших исследований и публикаций других авторов по состоянию загрязненности этих акваторий, по изученности процессов переноса и перемешивания и обсудить некоторые подходы по стабилизации и ослаблению загрязнения этой акватории.

1. Источники поступления сточных вод

У Крымского побережья основным источником поступления сточных вод являются сбросы с помощью канализационных выпусков вблизи приморских городов и курортных центров. В акваторию Кавказского шельфа помимо этого источника сточные воды поступают также и с речными водами. Речной сток по данным Альтмана и Кумыш [1] составляет здесь $43.1 \text{ км}^3/\text{год}$. Учитывая, что большинство рек Кавказского побережья связаны с Кавказской горной системой, где промышленность сравнительно

слабо развита и количество городов невелико, можно предположить, что доля сточных вод в объеме речного стока невелика и не превышает 3-5%. Этот вклад значительно меньше по сравнению с долей сточных вод в реках Дунай, Днепр, Днестр, Южный Буг, которые пересекают густонаселенные и высокоиндустриальные районы европейских стран и для которых доля сточных вод достигает 10-25% от объема речных вод [6].

Общий объем сточных вод от береговых канализационных систем городов и курортных центров у приглубых побережий Крыма и Кавказа достигает около $0.8 \text{ км}^3/\text{год}$. Эта величина получена в результате суммирования и критического отбора данных, полученных из проектных институтов, городских служб канализации, из бюллетеней и ежегодников, составляемых Государственным океанографическим институтом [5]. Нам представляется, что эта величина занижена, так как она не учитывает сбросы в море от сотен малых приморских населенных пунктов, небольших центров рекреации. Все они сбрасывают сточные воды вблизи берега, часто без всякой очистки.

Важными источниками поступления загрязненных вод в море являются ливневые стоки и сбросы дренажных вод с сельскохозяйственных полей. Данные санитарно-эпидемиологических станций показывают, что ливневые стоки в пределах городов имеют состав весьма близкий к составу сточных вод. Хотя поступление ливневых стоков является эпизодическим (только во время сильных ливней), но в этих случаях отмечается интенсивное бактериологическое загрязнение прибрежной зоны, и санитарная служба закрывает пляжи и запрещает купание после обильного поступления ливневых стоков в море. Сейчас отсутствуют корректные оценки объемов поступления от этих источников.

Для Крымского побережья существенным является приток загрязненных вод из Азовского моря через Керченский пролив, которые распространяются преобладающими течениями с востока на запад. Оценки объемов сточных вод, которые поступают в Азовское море с суши, характеризуются значительным разбросом величины. В публикациях ГОИНа отмечается, что этот объем равен 3.5 км^3 сточных вод в год [5].

Адвекция загрязненных вод ОЧТ из соседних акваторий является существенной, но такие оценки отсутствуют в литературе.

Учитывая все изложенное, можно предположить, что в шельфовую зону указанных акваторий поступает около 2.0-3.0 км³ сточных вод в год (непосредственный сброс через канализацию и приток с речным стоком). Поскольку это поступление происходит в узкой прибрежной зоне, где эффекты накопления наиболее выражены, состояние ее загрязненности намного выше, чем в зоне струйного течения.

2. Состояние загрязненности вод региона

Объемы поступления сточных вод из бывшего СССР в Черное море за 1989 и 1990 гг. по данным Ежегодника [5] составляли соответственно 971.8 и 625.8 млн. м³/год. Эти величины занижены, на наш взгляд, в несколько раз. Это можно подтвердить хотя бы одним примером. В табл. 22 (на стр. 93 [5]) объем сбросов у побережья Грузии в 1989 и 1990 гг. составлял 17.3 млн. м³/год. Между тем, по данным проектных институтов, Минкоммунхоза и санитарных инспекций Грузии и Абхазии общий объем сточных вод в 1980 г. только для 3-х районов (Гагра-м. Пицунда, Сухуми, Батуми) составлял 76.6 млн. м³/год, в 1990 г. - около 98 млн. м³/год. Это почти в 4-6 раз больше, чем приведенная величина из Ежегодника. Если привлечь данные для десятков других приморских неселенных пунктов, то замеченное расхождение будет еще более разительным. Авторы Ежегодника сами признают, что приведенные ими данные "можно рассматривать как сугубо ориентировочные" ([5] стр. 14.).

Среди загрязняющих веществ сточных вод много токсикантов типа нефтяных углеводородов (НУ), хлорорганических соединений, тяжелых металлов и др.

Значительная часть загрязненных вод формируется за счет вносимых удобрений. Так, за период 1976-1990 гг. среднегодовое количество удобрений, применяемых на водосборе кавказских рек, составило $40.7 \cdot 10^3$ тонн, что соответствует $2.03 \cdot 10^3$ тонн вымытых из них веществ в море [32].

Существенная доля нефтяных углеводородов может поступать в море с атмосферными осадками. По данным Рябинина А.И. [31] в дождевых водах в Крымском районе регистрировалось от 0.04 до 0.12 мг/л нефтепродуктов.

Максимальную антропогенную нагрузку испытывает узкая прибрежная зона. Так, экстремально высокие значения НУ в ра-

йоне Южного берега Крыма (ЮБК) отмечались в отдельных случаях в районе Алупки (до 140 ПДК), Симеиза (до 2690 ПДК), в Ялтинском порту (54 ПДК) и др. На побережье Грузии наиболее загрязнена Батумская бухта, где содержание НУ, фенола и ДДТ было высоким - 0.21 мг/л (4 ПДК), 0.018 (18 ПДК) и 3 нг/л соответственно [5].

Хотя в прибрежных зонах ЮБК и Кавказа в отличие от северо-западной части Черного моря необратимых экологических изменений пока не наблюдается, абсолютный максимум фосфатов в Черном море в период 1973-1985 гг. был зарегистрирован у побережья Грузии (950 мкг/л), а экстремальные значения нитратного азота отмечались в районе ЮБК (290 мкг/л). В прибрежных водах Кавказского побережья, так же как и в придунайском районе, отмечались максимальные значения γ -ГХЦГ (13-23 нг/л). Карты распределения НУ в центральной и восточной частях Черного моря летом 1986 г. в слое 0-0.5 м свидетельствуют также об их максимальных концентрациях (0.16 мг/л) у Грузинского побережья [20].

Хозяйственно-бытовые сточные воды являются доминирующим видом стоков приморских городов Крыма и Кавказа. Они содержат фосфорные и азотные соединения, концентрации которых не свойственны природным морским водам. Высокая метаболизируемость этих соединений способствует включению их в круговорот веществ, ускоряя наступление процесса эвтрофикации.

Процесс трансформации загрязняющих веществ является многоаспектным и требует специальных натурных и лабораторных исследований. Разработанная нами методология наблюдений на морском полигоне позволила изучить закономерности трансформации компонентов бытового стока на расстояниях от зоны первичного смешения сточных вод с морской водой до акватории с концентрациями, характерными для незагрязненных вод [9, 15, 17, 36]. Гидрохимические, гидробиологические, микробиологические и санитарно-эпидемиологические исследования выполнены по единой научной программе и в значительной мере дополняют друг друга [9, 15, 17, 36].

Эти работы позволили определить степень загрязнения и температурные условия, при которых наиболее интенсивно происходит процесс деструкции нестойкого органического вещества сточных вод. Установлено, что оптимальные условия распада

этих соединений в пробах морской воды составляют: по температуре 16-18°C, по окисляемости - 3.5-5.5 мг О₂/л [9,15]. Полученные данные позволяют выделить зоны наибольшей интенсивности самоочищения.

Особое внимание уделялось изучению эволюции загрязненных полей. Наблюдения проводились в прибрежных районах моря при различных глубинах расположения выпусков сточных вод (от уреза воды до глубины 86 м), при различном их удалении от берега (до 6.2 км), для разных расходов сточных вод (7-60 тыс. м³/сутки) и способов их очистки (неочищенные, механически очищенные, биологически очищенные).

Глубина сброса определяла степень загрязнения верхнего слоя моря вблизи выпуска сточных вод и глубину расположения поля стоков. Площадь акваторий, испытывающих влияние сточных вод, значительно больше при малых глубинах и неполной очистке стоков, чем при заглублении выпуска сточных вод. Даже при относительно малой чувствительности гидрохимических показателей к загрязнению бытовым стоком по сравнению с микробиологическими, измененный гидрохимический фон в районах выпусков сточных вод и на мелководье регистрировался на расстоянии не более 1000 м от источника. Наиболее интенсивное снижение концентрации органического вещества сточных вод и биогенных элементов (до 60%) отмечалось в непосредственной близости от выпуска, на расстоянии 50-100 м. Повышенные значения нитратного азота в поверхностном слое моря могли сохраняться на более значительном расстоянии от очага загрязнения.

В зависимости от температуры морской воды, скорости течения, а также расстояния от источника загрязнения скорость трансформации химических соединений изменяется в большом диапазоне. Установлено, что доминирующим фактором в процессе трансформации биогенного комплекса является температура. Этот фактор отражает участие в данном процессе гидробионтов, активность жизнедеятельности которых и температура среды взаимосвязаны.

При глубоководном сбросе сточных вод (на глубинах до 80-90 метров) эволюция загрязненных полей происходит под слоем скачка в толще вод на глубинах 40-60 м. Интенсивность деструктивных процессов и утилизация продуктов распада на

глубине затопления сточных вод меньше, чем в поверхностном слое моря. Тем не менее, благодаря высокой метаболизированности соединений бытового стока время круговорота их в глубинной толще составляет не более 10 суток.

Сравнение кинетики легкоусвояемого органического вещества и времени его круговорота в поверхностном слое моря и в толще вод показало, что наиболее высокие показатели деструкционных процессов характерны для поверхностных вод в эвтрофированных районах моря. За сутки в этих районах окисляется до 30% лабильных органических веществ, в глубинной толще - не более 10%. Несмотря на более слабую, чем в поверхностном слое, интенсивность деструктивных процессов в толще вод, в районе глубоководного выпуска и на прилегающей акватории из-за больших величин разбавления накопления органического вещества и минеральных биогенных веществ не наблюдалось (рис. 1). Сравнение данных 60-х годов с данными 1980-1986 гг. показали, что среднее содержание фосфатов и нитратов в Ялтинском заливе почти не изменилось [9, 33].

Исследования гидрохимической структуры вод в прибрежной зоне моря вне прямого антропогенного воздействия позволили оценить вклад и влияние различных по своей природе естественных факторов на экологическое состояние этих акваторий. Разброс значений гидрохимических показателей, связанных с природными процессами, порой шире и в пространстве, и во времени, чем локальное антропогенное воздействие. Сопоставляя поступление минерального азота и фосфора с речными и сточными водами, установлено, что доминирующим источником поступления минерального азота в прибрежную зону моря являются речные воды, фосфатами в большей степени обогащены сточные воды. Так, расчеты, выполненные для мелководья юго-западной части Крыма, показали, что вынос нитратов рекой Бельбек в 42 раза превышал вынос их со сточными водами от близлежащего выпуска; фосфаты, напротив, в сточной воде в 16 раз превышали содержание в речной воде. А в районе ЮБК от Алушты до м. Сарыч количество фосфатов, поступивших со сточными водами, в 200 раз превышало поступление с речными водами, тогда как нитратный азот - только в 1.3 раза.

Важным источником поступления биогенных соединений являются процессы зимней конвекции и стонно-нагонные явления.

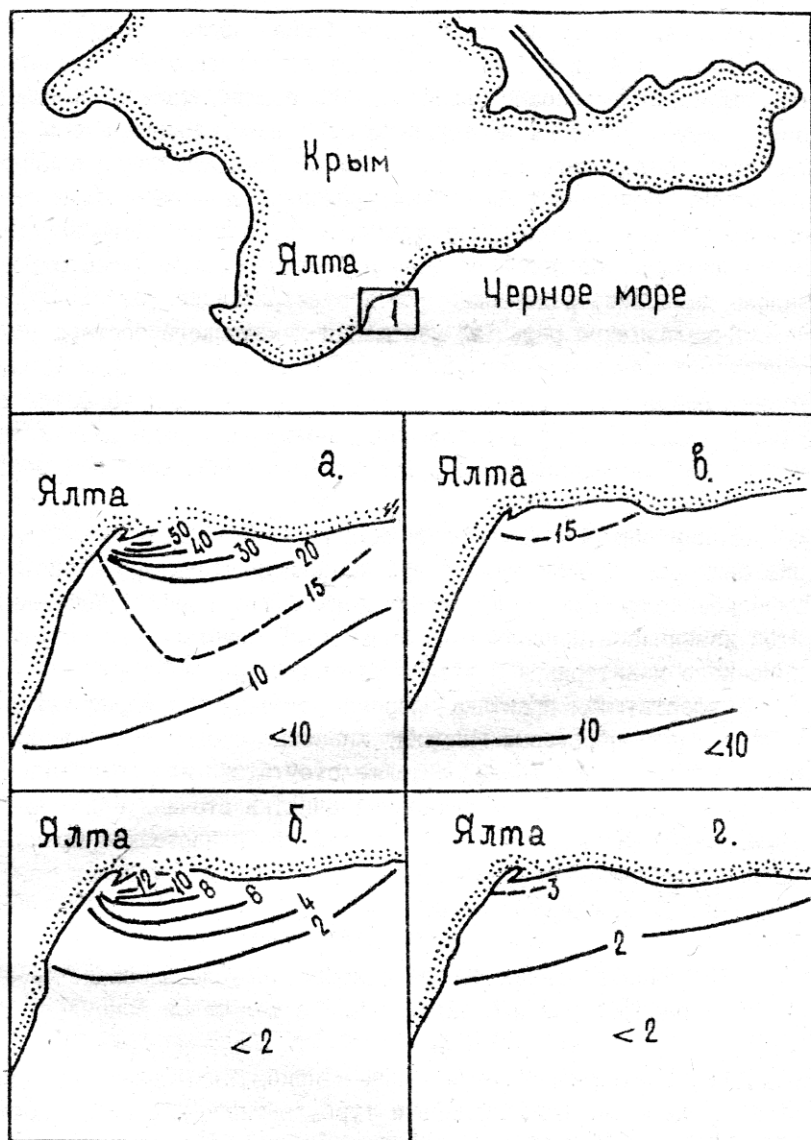


Рис. 1. Распределение фосфатов PO_4 (а, в) и нитратов NO_2 (б, г) в поверхностном слое Ялтинского залива для двух ситуаций удаления сточных вод в море: при работе мелководного (а, б) и глубоководного (в, г) выпусков сточных вод.

В частности, в юго-западной части Крыма после холодной и продолжительной зимы 1985 г. за счет глубокого конвективного перемешивания произошло увеличение на порядок запаса фосфатов и нитратов под 1 м² верхнего слоя по сравнению с тем же периодом предыдущего года [14]. При стгонных ситуациях помимо повышения содержания биогенных элементов в верхнем слое отмечается еще и значительное снижение содержания растворенного кислорода, которое по своему недонасыщению не регистрировалось даже непосредственно у очага загрязнения. [29]

Немаловажную роль в изменении химического состава вод прибрежной зоны моря могут играть плантации марикультуры. Кроме повышения содержания минерального азота и фосфатов в районе мидийных коллекторов нами отмечалось повышение концентрации легкоокисляемого органического вещества в 3-4 раза [14].

Таким образом, для различных регионов шельфа соотношение факторов, формирующих гидрохимическую структуру и экологическое состояние вод, может меняться, и для определения этой изменчивости необходимо проведение комплексного экологического мониторинга в этой акватории.

Существующая практика сброса сточных вод через мелко-водные и близбереговые выпуски, ливневые стоки, смыв удобрений и пестицидов с полей, а также отсутствие или недостаточная эффективность предварительной очистки сточных вод - факторы, характерные для приглубых шельфов в настоящее время и предопределяющие эвтрофирование вод и высокий уровень загрязненности прибрежной зоны.

3. Основные динамические факторы, обуславливающие распространение загрязнений в шельфовой зоне

Распространение загрязнений в прибрежной зоне обусловлено процессами адвективного и турбулентного переноса, которые определяются суперпозицией воздействия многих факторов [15, 29]. К ним относятся анемо-барические процессы, гидродинамическая неустойчивость ОЧТ с образованием синоптических и мезомасштабных вихрей, инерционные и бризовые колебания, захваченные шельфовые и внутренние волны, стгонно-нагонные явления [8, 10, 24, 26, 28]. Важное значение имеет также

рельеф дна шельфовых зон и изрезанность береговой черты прибрежных регионов, при обтекании которой ОЧТ формируются морфометрические вихри [27].

3.1. Адвективный перенос.

Циркуляция вод на шельфе тесно коррелирована с динамикой ОЧТ над свалом глубин, представляя собой единое явление. Циклонически перемещающиеся со средними скоростями 35-50 см/с над свалом глубин ОЧТ охватывает зону шириной от 20 до 45 км [10]. Между ОЧТ и берегом активно формируются антициклонические вихри [16, 20, 35]. Характерная черта режима течений на шельфе - бимодальное распределение вероятностей их направлений вдоль изобат [15-18, 34, 35]. Анализ многочисленных данных (буйковые станции с измерителями течений, электромагнитный метод измерения течений, траектории дрейфа дискретных и непрерывных трассеров) показывает, что повторяемость вдольберегового переноса достигает до величин 70-80% [15, 17, 18, 24, 25, 28], а устойчивость его направления растет с приближением к зоне ОЧТ, достигая в районе ЮБК 94% (рис 2). В узкой прибрежной зоне возможно в отдельные периоды преобладание обратного вдольберегового переноса, и суммарная повторяемость движений вод вдоль изобат является преобладающей во все сезоны года.

Среднемесячные значения скоростей, их пульсации и кинетическая энергия имеют выраженный годовой ход: минимум в мае-июне и максимум в декабре-январе [28, 35].

В узкой прибрежной зоне локальные и крупномасштабные воздействия ветровой циркуляции вызывают чередующиеся сгонно-нагонные явления (с периодом несколько суток и проявляющиеся, как правило, внутри толщи вод), стимулируя мозаичную картину мезомасштабного вихреобразования различной завихренности (с диаметрами от 2-5 до 10-20 км). В процессе такой перестройки движения в поверхностном и глубинном слоях имеют противоположную направленность, идентифицируя компенсационные процессы [26-28, 30]. В прибрежной зоне ЮБК за год наблюдается в среднем 3 сильных сгона продолжительностью 3-5 суток при вдольбереговых течениях восточных румбов со скоростями 40-60 см/с. Нагонные эффекты преобладают.

Отмечается рост скоростей течений в несколько раз с удалением от береговой черты к зоне ОЧТ. В районе Кавказа

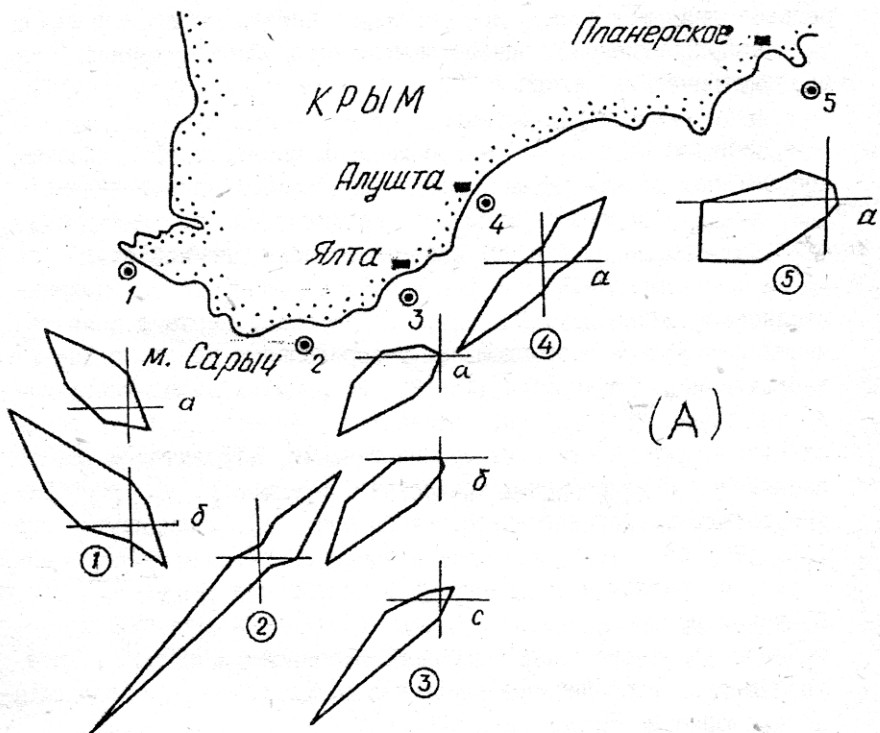


Рис. 2. Розы повторяемости направлений течений в шельфовой зоне Крымского (А) и Кавказского (Б) побережий Черного моря:

А - 1, 2, 3, 4, 5 соответственно в районах Севастополя, мыса Сарыч, Ялты, Алушты и Планерского;

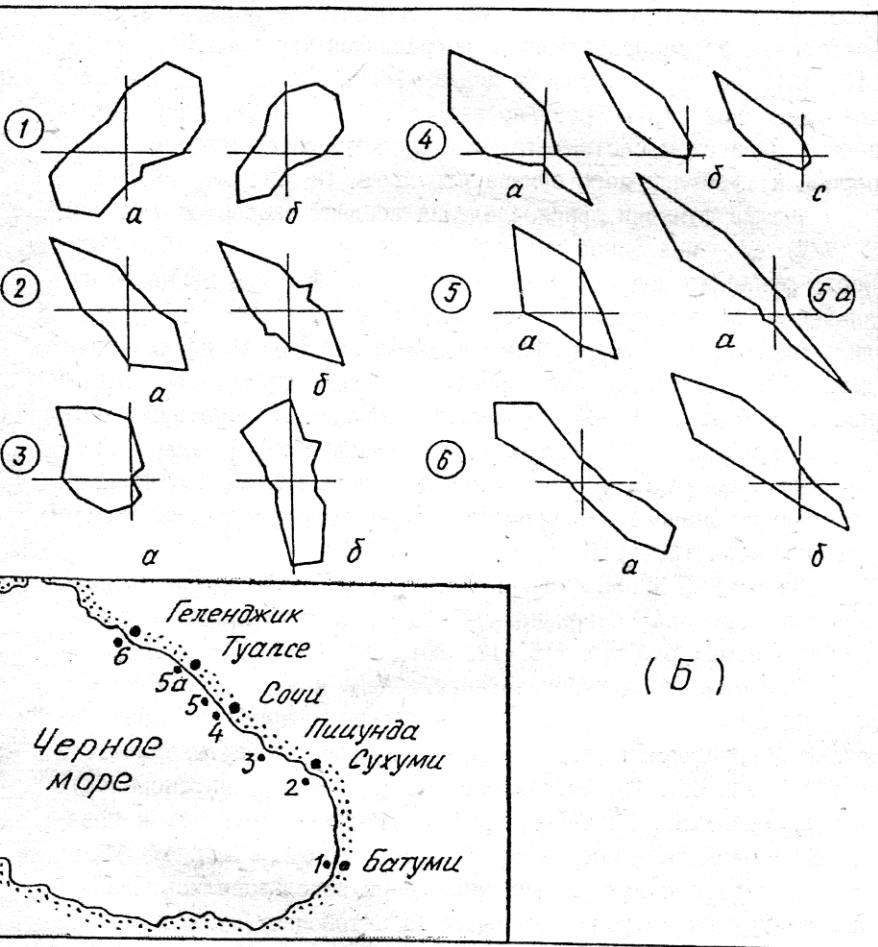


Рис. 2. Б - 1, 2, 3, 4, 5, 5а, 6 - полигоны соответственно в районах Батуми, Сухуми, мыса Пицунда, Сочи, Лазаревского, Туапсе и Геленджика. Данные по Геленджикю взяты из работы [35].
а, б, с - соответственно горизонты 10, 25 и 50 м.

максимальные скорости в нескольких милях от берега достигали 100-150 см/с, а скорости до 60 см/с имели обеспеченность около 90%. Осредненный профиль скорости в шельфовой зоне аналогичен ее распределению в пограничном турбулентном слое [15, 18], а горизонтальная изменчивость близка к турбулентной сдвиговой структуре, проявляющейся в преобладании поперечных сдвигов и соответствующей анизотропии эллипсов дисперсии и турбулентного обмена импульсом [8, 21, 24, 28].

Анализ функции распределения средних скоростей течений $F(V/\tilde{V})$ ($\tilde{V}$ - медианное значение распределения) показал близость функций для районов, где $\tilde{V} > 20$ см/с или менее этого значения. Существование порогового значения скорости позволило рассчитать осредненные функции распределения для двух диапазонов скоростей для характерного вдольберегового переноса вод (рис. 3). Подобные аппроксимации, рассчитанные методом Бернштейна, получены и для мелководного шельфа. Проверкой показана их универсальность, позволяющая прогнозировать повторяемость скоростей в различных шельфовых зонах Черного моря [2, 15].

Детальный анализ течений шельфовой зоны применительно к вопросу переноса загрязненных вод от мест их выпуска приводятся в наших работах [15, 17, 30].

3.2. Процессы турбулентного обмена в шельфовой зоне.

Процессы перемешивания существенно влияют на поведение полей загрязненных вод, определяя масштабы вертикального и горизонтального распространения поля примесей, интенсивность его разбавления, закономерности внутренней структуры и поведения поля в зависимости от фоновых условий.

В качестве материалов наблюдений использовались данные длительных регистраций течений на автономных буйковых станциях, эксперименты по прослеживанию дрейфа дискретных дрейфтеров. Методы обработки и анализа полученных данных обсуждаются в работах [8, 17, 21, 25, 28].

Исследования показали, что в масштабах характерных прибрежных вихрей (5-10 км) доминирующую роль играют инерционные движения (период 16-18 часов). Анализ таких параметров динамической активности, как плотность кинетической энергии турбулентности (Q) и коэффициенты горизонтального обмена импульсом (A) позволил рассмотреть их пространственно-времен-

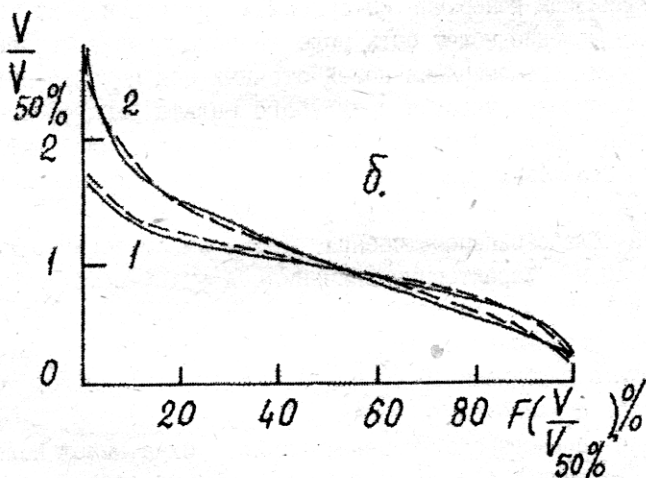
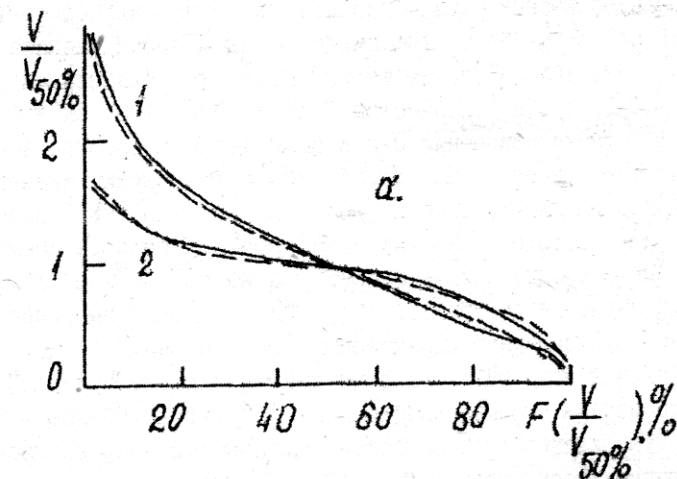


Рис. 3. Осредненные интегральные функции распределения скоростей преобладающих течений на мелководном шельфе (а) и в поверхностном слое приглубого шельфа (б) [2]:
 а) 1 - $\bar{V}_{50\%} < 20$ см/с; 2 - $\bar{V}_{50\%} > 20$ см/с;
 б) 1 - для преобладающего переноса вдоль берега;
 2 - для переноса по нормали к берегу.
 — — — эмпирическое распределение; - - - - теоретическое распределение по методу Бернштейна [2].

ную изменчивость. Для средних величин Q и A в теплый период года в шельфовой зоне Крыма характерны значения соответственно $75 \text{ см}^2/\text{с}^2$ и $(8-20) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$, а на шельфах Кавказа $90 \text{ см}^2/\text{с}^2$ и $(8-33) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$. На шельфе Болгарии, охваченном мейдами ОЧТ, эти параметры достигали $170 \text{ см}^2/\text{с}^2$ и $(32-59) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$. Значения Q и A были тесно коррелированы с выраженностью инерционных колебаний α (отношение значений спектральной плотности энергии вращения по и против часовой стрелки на частоте инерции), которые для шельфов Крыма и Кавказа имели средние значения 3-5, а на болгарском шельфе достигали значений 40-50 [23, 24, 28]. Именно инерционные колебания обуславливают характерный рост значений Q и A с приближением к зоне ОЧТ. На фоне снижения интенсивности обменных процессов от поверхности моря до глубин 100-200 м локальное увеличение динамической активности наблюдалось в промежуточных слоях шельфа [8, 17, 28], что связано с резонансным механизмом генерации инерционных колебаний в их толще [28]. Это явление может быть полезно использовано с целью интенсификации перемешивания полей сточных вод в толще вод.

Для эталонного участка приглубого шельфа Южного берега Крыма обобщение полученных массовых данных позволило дифференцировать шельфовую зону по динамической активности вод [28]: (рис. 4)

1. Зона слабого перемешивания, до 2 км от берега, глубины до 30-40 м. Характерные значения: $A = 10^4 - 5 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$, $Q = 20-40 \text{ см}^2/\text{с}^2$, α - до 3.

2. Зона умеренного перемешивания, в среднем зона в 2-5 км от берега с глубинами 40-80 м: $A = 5 \cdot 10^4 - 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$, $Q = 40-60 \text{ см}^2/\text{с}^2$, $\alpha = 2-5$.

3. Зона повышенного перемешивания, охватывает полосу шельфа на удалении 5-10 км, с глубинами 80-150 м: $A = (1-3) \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$, $Q = 60-100 \text{ см}^2/\text{с}^2$, $\alpha = 4-7$.

Анализ пространственно-временной изменчивости турбулентной структуры вод шельфовой зоны использовался в качестве одного из подходов при разработке рекомендаций по оптимальному расположению оголовка глубоководного выпуска сточных вод в районе Ялты с целью обеспечить условия их интенсивного перемешивания [8, 17, 33], а также и для других районов [28, 30].

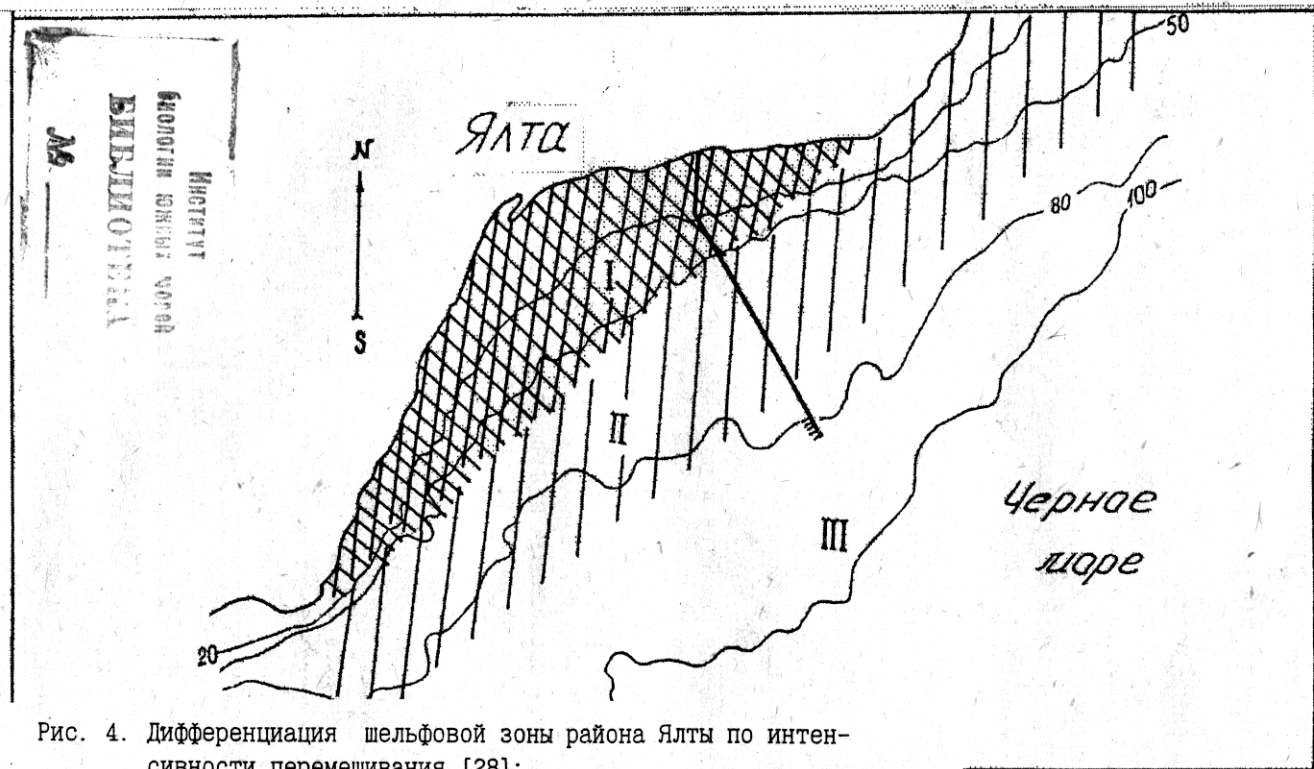


Рис. 4. Дифференциация шельфовой зоны района Ялты по интенсивности перемешивания [28]:

I, II, III - соответственно зоны слабого, среднего и интенсивного перемешивания вод (оголовки глубоководного выпуска сточных вод расположен в зоне III).

3.3 Закономерности распространения примесей в шельфовой зоне.

Исследование распространения примесей в шельфовой зоне Черного моря с помощью натурального моделирования процессов турбулентной диффузии проводилось нами в течение многих лет. Сотни экспериментов с дискретными дрейтерами (ДР), измерений эволюции пятен и струй флуоресцентных красителей контактным способом (ФЛ), либо с помощью аэрофотосъемки (АФС) позволили изучить процессы переноса в широком диапазоне пространственных масштабов (от десятков метров до 15 км) и различных условиях динамики и структуры вод [4, 8, 17, 19, 25]. Исследовались характеристики эффективной диффузии, вызванной влиянием сложной суперпозиции случайных и детерминированных факторов [4, 15, 19, 28].

Выполнены оценки дисперсий распределения концентрации красителя и соответствующих коэффициентов турбулентной диффузии K . Обобщение расчетов K по данным ДР, ФЛ, АФС выявило диапазон изменения его значений от 10^2 до $5 \cdot 10^5$ $\text{см}^2/\text{с}$ для масштабов $l = 0.1-15$ км [4, 19, 21]. Коэффициенты вертикальной диффузии при различных условиях стратификации вод и течений в верхнем слое варьировали в интервале: $K_z = (2 \cdot 10^{-2} + 7 \cdot 10^1)$ $\text{см}^2/\text{с}$. Преобладали величины K_z , близкие к среднему значению $K_z = (2 + 3)$ $\text{см}^2/\text{с}$ [4, 18, 19].

Анализ отдельных зависимостей вида $K \sim l^n$ по данным ДР показал широкий интервал изменения параметра $n = 0.2-1.3$ для различных фоновых условий и масштабов явлений, что в целом совпадало с расчетами дисперсий и K по данным ФЛ [4, 17-19]. Обобщенная зависимость $K \sim l^n$ в масштабах 0.1-15 км аппроксимировалась линейной функцией [21]. Такая связь характерна для турбулентного пограничного потока, условия которого близки к динамике прибрежных течений [15, 18].

На основе кусочной аппроксимации данных массовых расчетов параметров пространственного распределения ДР была построена общая фазовая схема диффузии в шельфовой зоне моря [22].

Обобщенная схема горизонтальной диффузии хорошо согласуется по энергетике и пространственно-временным масштабам турбулентных вихрей с обобщенной схемой энергоснабжения течений [22, 25, 28]. Первая фаза ($K_1 = \text{const}$) соответствует

"фииковской" диффузии, третья - характерна для моделей "сдвиг-диффузия" ($K \sim t^2$), в четвертой, по-видимому, наблюдается асимптотический режим. Универсальность существования нескольких автомоделных режимов диффузии подтверждена данными АФС и ФЛ [14, 15, 18]. Общая схема горизонтальной диффузии, так же как и результаты отдельных диффузионных опытов, удовлетворительно интерпретируется в рамках модели диффузии в турбулентном сдвиговом потоке [22, 28]. Усиление сдвиговых явлений приводит к большей анизотропии и интенсификации эффективного рассеяния во вдольбереговых потоках по сравнению с потоками в направлении нормальном к берегу [21, 25, 27].

Выявлены некоторые важные особенности процессов турбулентной диффузии:

- обнаружено явление сверхбыстрой горизонтальной диффузии на устьевом взморье шельфовой зоны Кавказа с резко выраженной плотностной стратификацией вод [4, 19];

- описаны особенности процессов диффузии в зоне стокового фронта вблизи устьевого взморья, определяющие интенсификацию процессов вертикального перемешивания [4, 19];

- выявлены особенности расщепления всплывающего факела сточных вод при их глубоководном выпуске, связанные с термохалинной структурой вод, и распространения затопленного поля сточных вод в условиях устойчивой плотностной стратификации вод [7, 11, 19].

Полученные результаты в рамках натурального моделирования процессов распространения примесей в море отражают основные черты и особенности этих процессов, которые необходимы для математического моделирования самоочищения вод в шельфовой зоне и для решения природоохранных задач, связанных с оптимальным расположением выпусков очищенных сточных вод и охлажденных вод в море от тепло-насосных станций [15, 28, 30].

4. Некоторые подходы по ослаблению антропогенного пресса у приглубых побережий

Самым оптимальным способом защиты морских акваторий от загрязнения является реализация бессточного производства. В то же время неупорядоченный сброс сточных вод в узкую приоб-

режную зону активно продолжается. В настоящее время десятки и сотни мелких и средних канализационных выпусков (построенных ранее и стоящих сейчас) размещаются вблизи берега без всякого экологического обоснования, что приводит к интенсивному загрязнению этих акваторий [9, 13, 15, 17].

Между тем, учет и использование многих благоприятных природных процессов (гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических) и на основе этого оптимальное пространственное расположение выпусков в сочетании в эффективной очисткой стоков могут существенно ослабить и минимизировать тот антропогенный пресс, который испытывает прибрежная зона. Условия плотностной стратификации, адвективного переноса, процессы турбулентного перемешивания, особенности гидрохимических и гидробиологических процессов в приглубой шельфовой зоне требуют особого подхода и могут быть весьма удачно использованы для указанных целей [7, 11, 15, 17, 19].

Результаты наших исследований показали, что при глубоководном сбросе сточных вод (на глубинах порядка 80-90 м) и их подъеме (всплывании стоков) к поверхности в условиях значительной плотностной стратификации происходит расщепление всплывающего факела на 2-3 (и больше) затопленных струй. Такое расщепление способствует более интенсивному перемешиванию, и в дальнейшем более активной трансформации поля сточных вод за счет биохимических и биологических процессов [7, 11, 19].

Если к тому же такой рассеивающий выпуск расположен вблизи струйного течения (вне зоны влияния морфометрических вихрей), где устойчивость переноса вод, скорости течений, степень турбулизации и перемешивания более благоприятны для разбавления и трансформации очищенных стоков (чем в прибрежной зоне), то реализация такого подхода может привести к существенным положительным результатам. Комплексные исследования на модельном полигоне в районе Ялты выявили следующие особенности этой акватории.

1. С приближением к стрезню ОЧТ увеличивается повторяемость циклонического вдольберегового переноса, наблюдается рост скоростей, уменьшается вероятность попадания примесей в прибрежную зону, ослабляются эффекты возможного "прилипания" прибрежных течений к берегу и эффекты накопления в узкой

прибрежной зоне [17, 20, 35]. Рост скоростей течения от берега до стржня ОЧТ, установленный во многих работах [7, 17, 20, 35], позволяет разместить выпуск в зоне более интенсивного и устойчивого переноса.

2. По мере приближения к стржню ОЧТ значительно возрастает интенсивность горизонтального перемешивания [4, 7, 8, 17, 19]. Это обусловлено ростом скоростей течений, влияющих на степень турбулизации потока, увеличением масштабов вихреобразования и другими динамическими эффектами вблизи свала глубин.

3. Результаты исследований показывают, что гидрохимические и гидробиологические процессы трансформации загрязненных вод, а значит и процессы самоочищения вод, протекают более интенсивно в динамически активных акваториях [15, 33].

Такие подходы позволили нам обосновать оптимальное пространственное расположение глубоководного выпуска очищенных стоков в районе Ялты. Этот проект осуществлен в 1978 г. В последующие годы проведены исследования эффективности его работы с различной степенью предварительной очистки стоков. Оголовок выпуска расположен в 6.2 км от берега на глубине 86 м и представляет собой рассеивающий линейный источник в виде системы конфузоров [9, 15, 33].

Расщепление всплывающего факела по вертикали на ряд струй и расположение выпуска вблизи ОЧТ вне зоны влияния морфометрических эффектов, привело к активизации процессов перемешивания и включению струй сточных вод в систему ОЧТ. Удалось устранить перенос сточных вод в прибрежную зону водопользования. Сравнение гидрохимических исследований 50-60 гг. и результатов 1980-1986 гг. показало, что эффекта накопления биогенных веществ в этом районе не обнаружено. Среднее содержание нитратов и фосфатов за этот период почти не изменилось (фосфаты - 0.20 мкг-ат/л, нитраты - 0.34 мкг-ат/л). Гидрохимические показатели в прибрежной зоне и в акватории выпуска близки к фоновым значениям зоны ОЧТ [9, 15, 33].

Гидробиологические и санитарно-бактериологические исследования после ввода в действие глубоководного выпуска показали, что в зоне водопользования и акватории Ялтинского залива качество воды заметно улучшилось после введения в строй этого сооружения [3, 13, 33]. В работе [13] делается

вывод, что наблюдения за эффективностью работы глубоководного выпуска в районе Ялты "позволяет дать высокую оценку его работы с санитарно-микробиологических позиций и рассматривать эксплуатацию выпуска как основное профилактическое мероприятие по предотвращению микробного загрязнения прибрежной зоны моря".

Ввод в действие комплекса "глубоководный выпуск - система очистных сооружений" позволил оздоровить зону водопользования Ялтинского курорта. Эффективность этого комплекса была бы неизмеримо больше, если бы удалось решить следующие проблемы: ликвидацию ряда старых близбереговых выпусков и подключении всей канализации района к глубоководному выпуску, реконструкцию прибрежной части подводного трубопровода, в котором из-за некачественной прокладки возникают аварии, достижение стабильной работы очистных сооружений.

Опыт исследования эффективности этого сооружения свидетельствует о том, что для приглубых побережий Черного моря оптимальное пространственное расположение глубоководных выпусков очищенных сточных вод может существенно ослабить или устранить отрицательные эффекты, связанные со сбросами сточных вод в море.

ВЫВОДЫ

1. Приглубые шельфы Крыма и Кавказа интенсивно загрязняются от различных источников: сброса сточных вод через канализационные системы, поступление загрязнений с речным стоком, с сельскохозяйственных полей и др. Поступление сточных вод непосредственно через канализацию и с речным стоком оценивается в объеме 2-3 км³/год. Выявлен заметный уровень загрязненности вод региона, определяемого поступлением значительного биогенного стока, нефтепродуктов, хлорированных углеводородов и других токсикантов. Трансформация затопленного поля сточных вод в районе глубоководного выпуска из-за активного перемешивания и разбавления стоков не приводит к эффекту накопления органического вещества и минеральных биогенных веществ. Установлено, что основным источником поступления минерального азота в прибрежную зону являются речные воды, фосфатов - сточные воды.

2. Обсуждаются основные характеристики адвективного переноса и турбулентного перемешивания, оказывающие влияние на поведение поля загрязненных вод: бимодальное распределение вероятностей направления течений, рост скоростей с удалением от берега до зоны ОЧТ, формирование завихренности между берегом и ОЧТ, закономерности турбулентного обмена и диффузии в шельфовой зоне. Выявлен фазовый характер процесса эффективной диффузии и диапазон изменения коэффициентов диффузии для масштабов явления от 0.1 до 15 км.

3. Исследования на модельном полигоне в акватории глубоководного выпуска показали, что накопления биогенных веществ в Ялтинском заливе и на прилегающих акваториях не обнаружено, а качество вод по гидробиологическим и санитарно-бактериологическим показателям заметно улучшилось после введения в строй этого сооружения. Исследования позволяют сделать вывод, что у приглубых шельфов Крыма и Кавказа оптимальное пространственное расположение глубоководных выпусков очищенных стоков может существенно ослабить и устранить отрицательные эффекты, связанные с удалением сточных вод в море.

Литература

1. Альтман Э. Н., Кумыш Н. И. Многолетняя и внутригодовая изменчивость баланса пресных вод Черного моря // Труды ГОИН. - 1986, N 176. - С. 3-18.
2. Ащиховская Ж. М., Розман Л. Д. Исследование функций распределения скоростей течения в шельфовой зоне Черного моря и возможность использования их для оценки переноса инородных примесей // Материалы Всесоюз. симп. по изученности Черного и Средиземного морей. - Киев: "Наукова думка", 1973. - Ч. 1. - С. 36-40.
3. Григорьева Л. В., Корчак Г. И., Бондаренко В. И. и др. Микробиологический контроль зон рекреации как мера профилактики заболеваемости людей // Состояние, перспективы улучшения и использования морской экологической системы прибрежной части Крыма. - Севастополь, 1983. - С. 48-50.

4. Динамика вод и продуктивность планктона Черного моря / Под ред. В.И.Заца и З.З.Финенко. - М.: Институт океанологии АН СССР, 1988. - 429 с.
5. Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям за 1990 г. // ГОИН. - Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 1991. - 277 с.
6. Зац В.И. Оценка некоторых крупномасштабных источников загрязнения вод Черного моря // Институт биологии южных морей АН Украины. - Севастополь, 1993. - 36 с. - Деп. в ВИНТИ 08.04.93. - N 894-B93.
7. Зац В.И. Значение гидрофизических исследований при решении природоохранных задач // Иссл. экосистемы пелагиали Черного моря (Материалы междунар. симп. "Антропогенная эвтрофикация и изменчивость экосистем Черного моря" - М., 1986. - С. 19-32.
8. Зац В.И., Озмидов Р.В. Турбулентность и перемешивание в Черном море // Иссл. по динамике и гидрохимии Черного моря / Под ред. А.С.Саркисяна. - М., 1978. - Ч. II. - С. 237-291.
9. Изменение физико-химических свойств морских вод под влиянием загрязнения. Под ред. Е.Ф.Шульгиной. / Авторы: Ковригина Н.П., Куфтаркова Е.А., Куракова Л.В., Сеничкина Л.Г., Чепурнова Э.А., Шульгина Е.Ф. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 200 с.
10. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Под ред. Б.А.Нелепо / Авторы: Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др. - Л.: Гидрометеиздат, 1984. - 240 с.
11. Комплексный подход к исследованию глубоководных выпусков сточных вод // Зац В.И., Немировский М.С., Шульгина Е.Ф. и др. - Водные ресурсы. - 1979, N 6. - С.181-191.
12. Коновалова И.З. О профиле средней скорости поверхностных течений в прибрежной зоне Черного моря / Труды ГОИН. - 1970, N 103. - С. 129-136.
13. Корчак Г.И., Григорьева Л.В., Ерусалимская Л.Ф., Акопенко Н.Д. Глубоководный выпуск сточных вод как профилактика микробного загрязнения прибрежной зоны моря // Состояние, перспективы улучшения и исполь-

зования морской экологической системы прибрежной части Крыма. Тезисы конф. - Севастополь, 1983. - С. 114-116.

14. Куфтаркова Е.А., Ковригина Н.П., Бобко Н.И. Оценка гидрохимических условий бухты Ласпи - района культивирования мидий // Экология моря: - 1990. - Вып. 36. - С. 1-6.
15. Моделирование процессов самоочищения вод шельфовой зоны моря / Под ред. Заца В.И., Гольдберга Г.А. - Л.: Гидрометеиздат, 1991. - 230 с.
16. Овчинников И.М., Титов В.Б. Антициклоническая завихренность течений в прибрежной зоне Черного моря // ДАН. - 1990. - Т. 314, N 5. - С. 1236-1239.
17. Опыт теоретического и экспериментального исследования проблемы глубоководного сброса сточных вод на примере района Ялты / Авторы: Зац В.И., Немировский М.С., Андрущенко Б.Ф. и др. - Киев: "Наукова думка", 1973. - 274 с.
18. Параметризация динамических процессов в модели самоочищения шельфовых вод / Розман Л.Д., Ациховская Ж.М., Немировский М.С., Субботин А.А. // Методология прогнозирования загрязнения океанов и морей. Тезисы докладов. - М.: Московское отд. Гидрометеиздата, 1986. - С. 105-109.
19. Процессы турбулентной диффузии примесей в море. Под ред. В.И.Заца / Гольдберг Г.А., Зац В.И., Немировский М.С., Розман Л.Д. - Л.: Гидрометеиздат, 1986. - 208 с. (Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана. Т. 2)
20. Практическая экология морских регионов Черного моря. Под ред. В.П.Кеонджяна, А.М.Кудрина, Ю.В.Терехова. - Киев: "Наукова думка", 1990. - 251 с.
21. Розман Л.Д. Анизотропия диффузии дискретных поплавок в поверхностном слое моря // Geod. und Geophys. Veroffent. - 1979. - R. 4, N. 30. - P. 77-83.
22. Розман Л.Д. Режим рассеяния дискретных трассеров и энергоснабжения течений в шельфовой зоне Черного моря // Информ. бюлл. Координац. центра стран-членов СЭВ. N 18. - М., 1984. - С. 78-83.

23. Розман Л.Д. Тархова Э.П. Влияние перемешивания вод на распределение нефтеокисляющих микроорганизмов в поверхностном слое Черного моря // Экология моря. - 1984. - Вып. 16. - С. 60-65.
24. Розман Л.Д. Мезомасштабная и синоптическая горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен импульсом на западном шельфе Черного моря // Динамика вод и продуктивность планктона Черного моря. Под ред. В.И.Заца и З.З.Финенко. - М., 1988. - С. 90-120.
25. Розман Л.Д. Горизонтальная диффузия дискретных трассеров в поверхностном слое моря // Там же. - С. 121-149.
26. Розман Л.Д., Чекменева Н.И. Термохалинная структура и динамика вод в зоне марихозия бухты Ласпи и прилегающей акватории Черного моря // ИнБЮМ АН УССР. - Севастополь, 1990. - 44 с. - Деп. в ВИНТИ 07.12.90. - N 6170-B90.
27. Розман Л.Д. Прибрежные вихри и диффузия в Черном море как факторы рассеяния примесей // Океанографические аспекты охраны морей и океанов от химических загрязнений. Материалы Всесоюз. науч. симп. / Под ред. А.И.Симонова. - М.: Гидрометеиздат, 1990. - С. 179-183.
28. Розман Л.Д. Горизонтальное перемешивание вод в Черном море // Автореф. дис. канд. географ. наук. - М., 1985. - 23 с. - Гос. океанограф. институт.
29. Розман Л.Д., Куфтаркова Е.А. Влияние природных и антропогенных факторов на экологическое состояние прибрежной зоны Крыма // "Актуальные вопросы экологии Азово-Черноморского региона и Средиземноморья". - Сборник трудов научной конференции, 1993 г., г. Симферополь. - Симферополь, 1993. - С. 68-72.
30. Розман Л.Д., Гольдберг Г.А., Шапиро Н.Б., Михайлова Э.Н., Фомин В.В., Андросович А.И. Опыт математического моделирования природоохранных задач в шельфовой зоне Крыма // Там же. - С. 38-41.
31. Рябинин А.И. К оценке элементов баланса нефтяных и хлорированных углеводородов в морях // Исследование океанов и морей. - М.: Гидрометеиздат, 1983. - С. 203-212.

32. Смирнов М.П., Тарасов М.П., Корпоянов И.А. Антропогенная составляющая речного стока органических веществ с территории СССР. - Гидрохимические материалы. - Л.: Гидрометеиздат, 1990. - Т. 108. - С. 65-81.
33. Состояние качества воды прибрежной зоны района Ялты как результат комплекса природоохранных мероприятий / В.И. Зац, М.С. Немировский, Е.А. Куфтаркова и др. // III съезд советских океанологов. Секция физика и химия океана. Гидрохимия и проблемы загрязнения океанов и морей. Тезисы докладов. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - С. 96-98.
34. Титов В.Б. Статистические характеристики и изменчивость течений на западном шельфе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. - 1991. - N 2. - С. 41-46.
35. Титов В.Б. Характеристика режима прибрежных течений у северо-кавказского побережья Черного моря / Институт океанологии им. Ширшова АН СССР. Южное отделение. - Геленджик, 1989. - 99 с. - Деп. в ВИНТИ 20.07.89. - N 5320-B89.
36. Шульгина Е.Ф., Куракова Л.В., Куфтаркова Е.А. Химизм вод шельфовой зоны Черного моря при антропогенном воздействии. - Киев, "Наукова думка", 1978. - 121 с.

ЗАЦ Владимир Исаакович
РОЗМАН Лев Давидович
КУФТАРКОВА Елизавета Андреевна

ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИГЛУБЬХ ШЕЛЬФОВ КРЫМА И КАВКАЗА

Препринт

Утвержден к печати редакционно-издательским советом
ИНБЮМ НАН Украины