

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н., Романов А.С., Игнатъева О.Г.

**Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты
и его изменения под воздействием климатических
и антропогенных факторов**

**Севастополь
2006**

УДК 551.465 (262.5)

Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н., Романов А.С., Игнатьева О.Г. / МГИ НАН Украины. – Севастополь, 2006 – 90 с., рис. 37, табл. 3, библи. 58.

Рассмотрены гидролого-гидрохимические условия в Севастопольской бухте, которые сформировались в современный период под влиянием природных климатических и антропогенных факторов. Работа выполнена по результатам обобщения исторических материалов и данных междисциплинарных исследований, полученных при выполнении экологического мониторинга в 1998-2005 гг. Обсуждаются режимные характеристики гидрометеорологических элементов (температуры воздуха и воды, уровня моря, ветра и волнения) и их сезонная и многолетняя изменчивость. На основе данных океанографических съёмок рассмотрена термогалинная и гидрохимическая структура вод и ее сезонная изменчивость.

Работа предназначена для специалистов, занимающихся исследованиями экологических проблем морей и океанов.

Hydrological and hydrochemical regime of the Sebastopol Bay and its changing under influence of climatic and anthropogenic factors. / Ivanov V.A., Ovsyany E.I., Repetin L.N., Romanov A.S., Ignatyeva O.G. / MHI NAS of Ukraine. – Sevastopol, 2006. 90 pp., fig. 37, tabl. 3, ref. 58.

Hydrological and hydrochemical conditions in the Sebastopol Bay developed up to the present day under influence of natural climatic and anthropogenic factors are examined. Summarized historical data and results of interdisciplinary investigations received during 1998-2005 ecological monitoring are used. Behavior of hydro meteorological elements (air and water temperature, water-level, wind and roughness) and their seasonal and long-term variability are discussed. The seasonal variability of the thermohaline and hydrochemical structure is analyzed on a base of oceanographycal surveys.

The work is designed for specialists engaged in sea ecology investigations.

Содержание

Предисловие.....	4
Введение	5
Океанологические исследования в Севастопольской бухте: краткая историческая справка.....	7
Физико-географическая характеристика бухты	12
Материалы и методы исследований.....	14
Экологическое состояние: абиотические факторы и источники загрязнения бухты, масштаб и характер антропогенного воздействия.....	16
Гидрометеорологические условия и термохалинная структура вод	20
• Гидрометеорологические условия	21
• Термохалинная структура вод.....	30
Гидрохимическая структура вод	46
Особенности карбонатной системы вод бухты в условиях длительной антропогенной нагрузки	65
Особенности гидролого-гидрохимической структуры вод бухты в условиях летней стагнации.....	75
Биогеохимическое районирование акватории бухты	81
Заключение	82
Литература.....	86

Предисловие

Влияние океанологических факторов на экологическое состояние прибрежных морских акваторий при решении проблем рационального природопользования остается актуальным на протяжении многих десятков лет. Длительное загрязнение прибрежной полосы моря из разных источников (хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды, морской транспорт, речной сток, ливневые воды, стекающие с населенных, промышленных и сельскохозяйственных территорий и пр.) часто приводит к необратимым воздействиям на морскую среду и представляет большую опасность для здоровья людей при использовании морских продуктов и акватории в целях рекреации. При этом без исследования гидрологии и гидрохимии прибрежных вод изучить поведение загрязняющих веществ и влияние различных источников загрязнения на экологическое состояние морской среды не представляется возможным.

Севастопольская бухта очень активно используется на протяжении более двух столетий в различных сферах народного хозяйства. Бухта является гаванью для военных и торговых судов. По берегам бухты расположена историческая часть города Севастополя, а также промышленные предприятия (судоремонтные и судостроительные, нефтебаза, ТЭЦ и др.). В бухте функционируют более 30 выпусков сточных вод – аварийных, временных и постоянно действующих, через которые поступает от 10 до 15 тыс. куб. м сточных вод в сутки. Основной объём стоков сбрасывается без очистки. Бухта используется для судоходства и в рекреационных целях. Ранее акватория бухты использовалась как источник морепродуктов, однако сейчас такое использование не представляется возможным из-за высокого уровня загрязнения, которое определяется как широким спектром загрязняющих веществ, так и значительными их концентрациями, зачастую превышающими допустимые уровни. Таким образом, акватория бухты это не только морская среда обитания, но и объект хозяйственной деятельности.

Такое широкомасштабное использование ресурсов Севастопольской бухты определило повышенный интерес к исследованию различных аспектов состояния морской среды. К настоящему времени имеется значительное количество работ, которые характеризуют биоразнообразие, загрязнение бухты, санитарно-биологические аспекты экологии. Из недавних работ этого плана можно отметить обобщения, выполненные сотрудниками Института биологии южных морей НАН Украины и Морского отделения УкрНИГМИ (ранее – Севастопольское отделение ГОИН) [1-3].

В то же время исследованиям гидрологических и гидрохимических условий среды в бухте до последнего времени не уделялось достаточного внимания. Прежде это было связано с условиями использования Севастопольской бухты как военно-морской базы, а в

последние годы в связи с отсутствием финансирования для выполнения комплексных (междисциплинарных) региональных программ исследований.

Настоящее обобщение выполнено в основном по результатам наблюдений в бухте, которые проводились Морским гидрофизическим институтом (МГИ) НАН Украины в 1998-2005 гг. при финансовой поддержке проектов INTAS 99-01390, INTAS 01-0788 и INTAS 03-51-6196. Гидрометеорологическая характеристика представлена на основе обобщения материалов наблюдений Гидрометеослужбы Украины. Работа выполнена сотрудниками МГИ НАН Украины и МО УкрНИГМИ при поддержке целевой комплексной программы НАН Украины «Ресурсы шельфа».

Авторы настоящей работы отдают себе отчет, что целый ряд вопросов, связанных с оценкой состояния экосистемы бухты, остались вне рассмотрения по причине недостаточной их изученности и ограничения темы рассмотрения. Однако они надеются, что представленное обобщение полученных результатов исследований по гидролого-гидрохимическому режиму бухты позволит оценить состояние вопроса и наметить дальнейшие пути в разрешении назревших проблем. Необходимость постоянного контроля состояния морской среды импактных зон требует постоянного обновления данных, а также использования новых методологических подходов и возможностей, в том числе технологий дистанционного зондирования и ГИС.

Введение

Экологический мониторинг Севастопольской бухты осуществляется как составная часть мониторинга морской среды Севастопольского региона, организационная концепция которого была рассмотрена ранее [4]. Совместные междисциплинарные исследования экосистемы Севастопольской бухты научными учреждениями Национальной академии наук Украины – Морским гидрофизическим институтом и Институтом биологии южных морей были начаты в 1998 г в рамках выполнения проекта INTAS 99-01390 и в соответствии с общей концепцией мониторинга морской среды Севастопольского региона [4]. Основные результаты, полученные при данном исследовании, представлены в работах [6-14].

В дальнейшем этими институтами, совместно с другими научными учреждениями г. Севастополя, была инициирована разработка региональной "Комплексной программы охраны окружающей природной среды, рационального использования природных ресурсов и экологической безопасности г. Севастополя на период до 2010 г.", которая была принята к исполнению после её утверждения Городским советом депутатов г.

Севастополя в марте 2003 г. [5]. Экологический мониторинг Севастопольской бухты проводится в рамках задач этой Программы, хотя целевого финансирования для его выполнения до настоящего времени не было открыто. Это обстоятельство не позволяет реализовать Программу в должной мере.

В настоящее время исследования в Севастопольской бухте проводятся в рамках бюджетной темы Национальной академии наук «Исследование закономерностей функционирования шельфовых экосистем в условиях антропогенной и терригенной нагрузок» («ШЕЛЬФ»), а также проектов INTAS 01-0788 и INTAS 03-51-6196.

Согласно региональной экологической программе [5] в числе основных составляющих экологического мониторинга определены следующие:

- контроль и оценка состояния экосистемы прибрежной морской среды на основе синхронных междисциплинарных исследований – гидрофизических, гидрохимических, биологических и мониторинга загрязнений с использованием спутниковой информации;
- наблюдения за качеством среды по оптимизированной сетке станций с использованием автоматических и зондирующих приборов для измерения физических и химических показателей "in situ", отбора проб и лабораторного контроля;
- создание информационной базы данных;
- создание моделей и прогнозирование качества среды;
- разработка предложений по управлению качеством морской среды.

Необходимость проведения мониторинга Севастопольской бухты обусловлена тем, что данная акватория имеет многоцелевое использование (судоходство, судостроение и судоремонт, туризм и рекреация и т.д.). Так, например, коммунальные предприятия Севастополя используют бухты Севастопольского региона по следующим видам водопользования:

- как приемник условно-чистых сточных вод;
- для сброса неочищенных сточных вод при аварийных ситуациях;
- как приемник неочищенного ливневого стока.

Одной из целей мониторинга является исследование современного гидролого-гидрохимического режима бухты для составления диагноза и прогноза экологического состояния морской среды Севастопольского региона и использования полученных данных при выработке рекомендаций по уменьшению негативного антропогенного влияния на экосистему Севастопольской бухты.

В процессе выполнения мониторинга (в части гидролого-гидрохимических наблюдений) предусматривается решение следующих задач:

- исследовать особенности пространственного и временного распределения основных гидрологических (температура, соленость, прозрачность воды) и гидрохимических (растворенный кислород, рН, общая щелочность, минеральный фосфор, минеральные формы азота – аммоний, нитраты, нитриты) параметров в Севастопольской бухте;

- изучить внутригодовую изменчивость физических и химических параметров, оценить потоки биогенных веществ в бухте;

- оценить трофический уровень бухты в целом и её отдельных частей на основании полученных данных по гидрохимии и гидробиологии;

- выполнить экологическое зонирование акватории бухты и разработать структуру рационального природопользования с оптимальным обеспечением природоохранных мероприятий.

Полученные результаты предназначены для использования при разработке рекомендаций по комплексу мер защиты морской среды и её рациональному использованию.

Результаты выполненных в 1998-2002 гг. гидролого-гидрохимических наблюдений показали [6-14], что вследствие изменения основных режимообразующих факторов – речного стока, водообмена с сопредельной частью моря, а также постоянного загрязнения акватории сточными и ливневыми водами в экологическом состоянии Севастопольской бухты в современных условиях проявляются определенные негативные изменения. Последующие исследования в 2004-2005 гг. позволили уточнить некоторые особенности гидролого-гидрохимической структуры вод Севастопольской бухты.

Океанологические исследования в Севастопольской бухте: краткая историческая справка

Гидрографическое исследование Севастопольской бухты, которое выполнялось на начальном этапе и было обусловлено потребностями мореплавания, приурочено на конец XVIII – начало XIX вв., после того, как российские корабли вошли в бухту в 1783 г. Тогда были определены основные гидрографические составляющие – глубины, состояние грунтов, очертания берегов и пр., что в последующем нашло отражение в Полном атласе карт Черного моря, изданном в 1841 г. и первой лоции Черного моря, изданной Черноморским Гидрографическим депо в 1851 г. [15].

Систематические стационарные исследования в Севастопольской бухте гидрологических элементов (температуры, солености, плотности, уровня моря), по-видимому, следует отнести к моменту создания Севастопольской морской обсерватории

Черноморского флота в 1916 г. Обсерваторией также проводились режимные исследования гидрометеозлементов (температура воздуха, направление и скорость ветра, количество атмосферных осадков и пр.). Гидрологические наблюдения в бухте велись и Гидрографической службой Черноморского флота, однако результаты этих измерений не были доступны в силу режимного характера акватории как базы флота.

С открытием Севастопольской биологической станции гидролого-гидрохимические наблюдения проводились при выполнении биологических исследований и оценке состояния морской акватории как среды обитания. Зернов С.А. при исследовании биологического разнообразия в Севастопольской бухте (1910-1911 гг.) отмечал, что существенное изменение состояния биоценозов следует ожидать под влиянием антропогенной деятельности [16]. И действительно, уже в 30-е годы XX века отмечалось значительное загрязнение бухты и заметные изменения местной фауны [2].

Начиная с 30-х годов, Севастопольская биологическая станция АН СССР (впоследствии – Институт биологии южных морей АН УССР) проводит спорадические гидролого-гидрохимические исследования в бухте. Эти исследования М.А. Добржанской были посвящены определению солевого и газового состава вод бухты, а также биогенных элементов. Гидрохимические исследования, которые проводились в бухте в 1951-1958 гг., ставили своей целью установить особенности содержания и сезонный ход биогенных элементов, их отличие от режима открытой части моря. По данным ежемесячных наблюдений на одной станции в районе выхода из бухты в 1951-1955 гг. было установлено, что уровень содержания биогенных элементов (фосфатов, нитратов, нитритов, кремния) в поверхностных водах бухты заметно превышает их содержание в открытых водах моря. Хотя временное распределение биогенных элементов не всегда (из года в год) указывало на четко выраженную сезонную смену, для нитратов и кремния максимум содержания был приурочен к зимнему периоду (декабрь-февраль), а минимум отмечался в летние месяцы. Для фосфатов отмечались заметные межгодовые колебания концентраций без явных сезонных изменений. Однако в некоторые годы максимум содержания колебалось в пределах 5-9 мкг/л (0,16 - 0,29 мкМ) приходился на осенне-зимний период (октябрь-февраль), тогда как в остальное время года чаще всего содержание фосфатов было близким к аналитическому нулю [17-21].

В 40-50-х годах XX в. наблюдения в Севастопольской бухте выполнялись В.А. Яковенко и Н.Н. Алфимовым при изучении вопросов санитарно-гигиенического состояния прибрежной полосы моря. В этих работах для характеристики состояния среды помимо санитарно-бактериологических показателей (коли-титр, микробное число и пр.) использовались такие гидрохимические параметры как растворенный кислород,

окисляемость, биохимическое потребление кислорода (БПК₅), биогенные элементы и др. При этом изучалось также влияние гидрологических условий на санитарное состояние бухты [22-25]. По данным Алфимова Н.Н. в 1953-1956 гг. воды Севастопольской бухты характеризовались высокими значениями окисляемости и БПК. Средние величины окисляемости и БПК₅ в центральных частях бухты составляли 1,2 мгО₂/л и 2,89 мгО₂/л соответственно при средних значениях для открытого моря 0,9 мгО₂/л и 0,85 мгО₂/л. В местах стоянок судов окисляемость и БПК₅ были заметно выше и превышали значения для открытого моря в 1,5 и 4 раза соответственно [25].

В 60-х годах XX века гидролого-гидрохимические наблюдения в бухте выполнялись региональным подразделением Гидрометеослужбы СССР – Бассейновой гидрометеорологической обсерваторией Черного и Азовского морей (БГМО ЧАМ). При этом кроме измерения стандартных показателей (температура, соленость, цвет и прозрачность, растворенный кислород, биогенные элементы, pH, щелочность, окисляемость) для характеристики экологического состояния бухты определялись показатели как БПК₅, нефтепродукты, фенолы, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), азот аммонийный, некоторые тяжелые металлы и др. [26]. Полученные в 1964-1966 гг. данные указывают на высокое содержание в водах бухты фосфатов, нитритного и аммонийного азота, повышенные значения БПК₅ и окисляемости, что свойственно морским водам, загрязненным коммунальными стоками.

Содержание нитритов в поверхностном слое воды центральной части бухты составляло 1,8 – 34,2 мкгN/л (0,13 - 2,44 мкМ) и было высоким вне зависимости от сезона. Минимальные значения наблюдались весной в период массового цветения фитопланктона, максимальные – летом. Содержание нитратов колебалось в широких пределах – от 0 до 344 мкгN/л (0 – 24,6 мкМ). Максимальные значения отмечались в зоне влияния сточных вод. Такая же картина характерна и для аммонийного азота, содержание которого составляло от 0,08 до 10,4 мкгN/л (0,006 - 0,74 мкМ). Особенно высокие концентрации N-NH₄ отмечались летом.

Содержание фосфатов также было высоким во все сезоны года и составляло от 2,0 до 67,0 мкгP/л (0,06 - 2,16 мкМ). Максимальные значения обнаруживались в местах выпуска сточных вод. Исследование кислородного режима показало, что в летний период в придонных слоях наблюдается низкое содержание как абсолютных (до 2,19 мл/л), так и относительных (до 42% насыщения) значений растворенного кислорода. Летом на поверхности в местах, подверженных влиянию сточных вод, наблюдалось пересыщение вод кислородом до 190%, что объяснялось активной фотосинтетической деятельностью. В

зимний период распределение кислорода в толще вод было сравнительно равномерным от поверхности до дна, но абсолютные значения были ниже, чем весной и летом.

По данным исследований, выполненных М.А. Добржанской и Л.Ф. Ермаковой [20,26], концентрации биогенных элементов в бухте превышали значения, характерные для открытых вод от 10 до 100 раз, а величины БПК₅ в поверхностном слое вод бухты были выше, чем в чистых водах, в 6-10 раз. Полученные в 1964-1966 гг. значения величин по окисляемости и БПК₅ [26] были в два раза выше, чем измеренные в 1953-1956 гг. Н.Н. Алфимовым [25], что свидетельствует об увеличении загрязнения вод бухты органическим веществом.

Дальнейшее развитие исследований в Севастопольской бухте относится к 70-90 годам XX века, когда мониторинг морской среды выполнялся в рамках государственной программы ОГСНК (Общегосударственной службы наблюдения и контроля за уровнем загрязнения внешней среды). Мониторинг бухты осуществлялся в основном подразделением региональной сети Гидрометеослужбы СССР – Севастопольским отделением Государственного океанографического института (СО ГОИН). В соответствии с данной программой Севастопольская бухта была отнесена к морской акватории II категории [3]. Это предусматривало проведение наблюдений один раз в квартал на пяти фиксированных станциях, что не соответствовало тогда и не соответствует в настоящее время действительному состоянию бухты и требованиям нормативных документов. Согласно нормативным документам программы ОГСНК и ГОСТ 17.1.3.08-82 «Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля морских вод», который действует и в настоящее время, Севастопольская бухта по своему назначению (как район водопользования населения, портовая и припортовая акватория, место сброса муниципальных и промышленных сточных вод) должна быть отнесена к пункту контроля качества морских вод I категории. Для пункта контроля I-й категории предусмотрено выполнение ежемесячных наблюдений по полной программе по гидрологическим, гидрохимическим и гидробиологическим параметрам. Основное внимание при контроле Севастопольской бухты по программе ОГСНК в исполнении СО ГОИН уделялось наблюдениям за содержанием загрязняющих веществ (ЗВ), таких как нефтепродукты, фенолы, СПАВ, пестициды, металлы и пр. При обобщении результатов исследований гидролого-гидрохимическая структура вод бухты не рассматривалась [3].

В 1965-1971 гг. Институтом биологии южных морей НАН Украины (ИнБЮМ НАН Украины) при изучении микроорганизмов обрастаний (перифитона) выполнялись исследования абиотических факторов среды как фоновых характеристик (руководитель работ – Ю.А. Горбенко). На одной фиксированной станции у выхода из бухты в

поверхностном слое ежемесячно исследовались гидрологические и гидрохимические показатели (температура, соленость, кислород, pH, общая щелочность, фосфор минеральный и органический, нитриты, кремний, растворенное органическое вещество (РОВ), кальций и др). По результатам исследования показано, что колебания температуры морской воды имеют выраженный сезонный ход. Сезонные колебания величин других показателей не были такими отчетливыми. Так, изменения содержания нитритов, кремния, фосфора минерального и органического характеризовалось колебаниями максимальных и минимальных величин не зависимо от сезонов года. Сезонная изменчивость кислорода, кремния и РОВ находилась в зависимости от количества диатомовых [27].

К числу первых публикаций с описанием термогалинной структуры вод Севастопольской бухты относится работа, выполненная В.А. Морочковским и Ю.Л. Ковальчук [28]. В этой работе по результатам 9 съемок, выполненных в 1990-1991 гг. на сети из 20 станций, которые относительно равномерно покрывали акваторию бухты, была предпринята попытка рассмотреть гидрологический режим бухты и сезонную трансформацию термогалинной структуры. В то же время гидрохимические исследования были выполнены лишь в поверхностном слое вод на пяти станциях, расположенных по оси бухты. В работе отмечается, что колебания гидрохимических показателей имеют в основном сезонный характер. Изменение среднемесячных величин pH были в пределах 7,88-8,45. При этом низкие значения относились к осеннему периоду. Среднемесячная концентрация кислорода в поверхностном слое колебалась от 5,65 до 8,89 мл/л и была минимальной в зимний сезон. Отмечались значительные временные и пространственные колебания среднемесячных величин биогенных элементов (мкг/л): фосфаты от 0,0 до 21,17 (0 - 0,68 мкМ); нитриты от 0,0 до 7,30 (0 - 0,52 мкМ); нитраты от 0,40 до 28,0 (0,03 - 2,0 мкМ). Максимальные концентрации биогенных элементов наблюдались в осенне-весенний период и были приурочены к устью реки Черной [28].

Из приведенного обзора видно, что данных, которые позволяют характеризовать термохалинную и гидрохимическую структуру вод и режим бухты как акватории в целом, явно недостаточно. Проведенные ранее работы, как правило, носили ограниченный в пространстве характер и (или) выполнялись для решения частных задач, в которых гидролого-гидрохимические характеристики рассматривались как фоновые показатели для описания среды. При этом число станций и дискретность выполненных измерений не позволяют достаточно корректно исследовать пространственное и временное распределение гидролого-гидрохимических показателей и загрязняющих веществ для всей акватории бухты.

Таким образом, существующая информационная база данных по гидрологическим и гидрохимическим показателям не достаточна для корректного описания режимных характеристик. Кроме того, экологический мониторинг импактных зон неправомерно сводить лишь к отслеживанию уровня загрязнения морской среды и контролю источников поступления загрязняющих веществ. Именно такой подход просматривается в публиковавшихся ранее ежегодниках Гидрометеослужбы СССР и в современных информационных изданиях Министерства экологии Украины. Приведенная в них информация, как правило, не содержит анализа особенностей пространственного распределения ЗВ и влияния океанографических факторов. При выполнении мониторинга состояния морской среды необходима не только констатация фактов об уровне и масштабах загрязнения, но и диагноз, и прогноз состояния морской среды и рекомендации по улучшению ее качества и биоразнообразия по результатам анализа междисциплинарных мониторинговых наблюдений [4].

Физико-географическая характеристика бухты

Севастопольская бухта расположена на юго-западной оконечности Крымского полуострова (44°36'с.ш., 33°33'в.д.) и представляет собой полузамкнутую акваторию эстуарного типа с затрудненным водообменом. Ось бухты ориентирована примерно в широтном направлении с востока на запад. Южная сторона Севастопольской бухты характеризуется значительной изрезанностью рельефа: на протяжении побережья в меридиональном направлении чередуются узкие бухты – Артиллерийская, Южная, Корабельная, Килен-бухта (рис.1). Протяженность основной части бухты составляет 7,5 км при максимальной ширине около 1 км. Глубина бухты при входе достигает 20 м и плавно уменьшается к вершине до 4-5 м. Средняя глубина составляет 12,5 м. В естественном состоянии ширина бухты при входе (между мысом Константиновским и противоположным берегом на южной стороне) составляла 940 м. В 1976-1977 гг. вход в бухту был ограничен глухим защитным молом, в результате чего ширина входа сузилась до 550 м [6]. Это привело к существенному изменению водообмена с сопредельной акваторией. Величина водообмена уменьшилась в среднем за год на 40-70%, а время «полного» обмена вод в бухте увеличилось почти вдвое [29].

В восточной части (в вершине) бухта принимает воды реки Черной. Река Черная - одна из наиболее многоводных рек юго-запада Крыма. Как и другие реки региона, р.Черная относится к паводочному типу. Основная часть стока (до 80%) приходится на зимний и весенний периоды. При площади бассейна водосбора 427 км² среднегодовой сток для замыкающего створа (с. Хмельницкое) составляет 56,8 млн. м³ (для периода

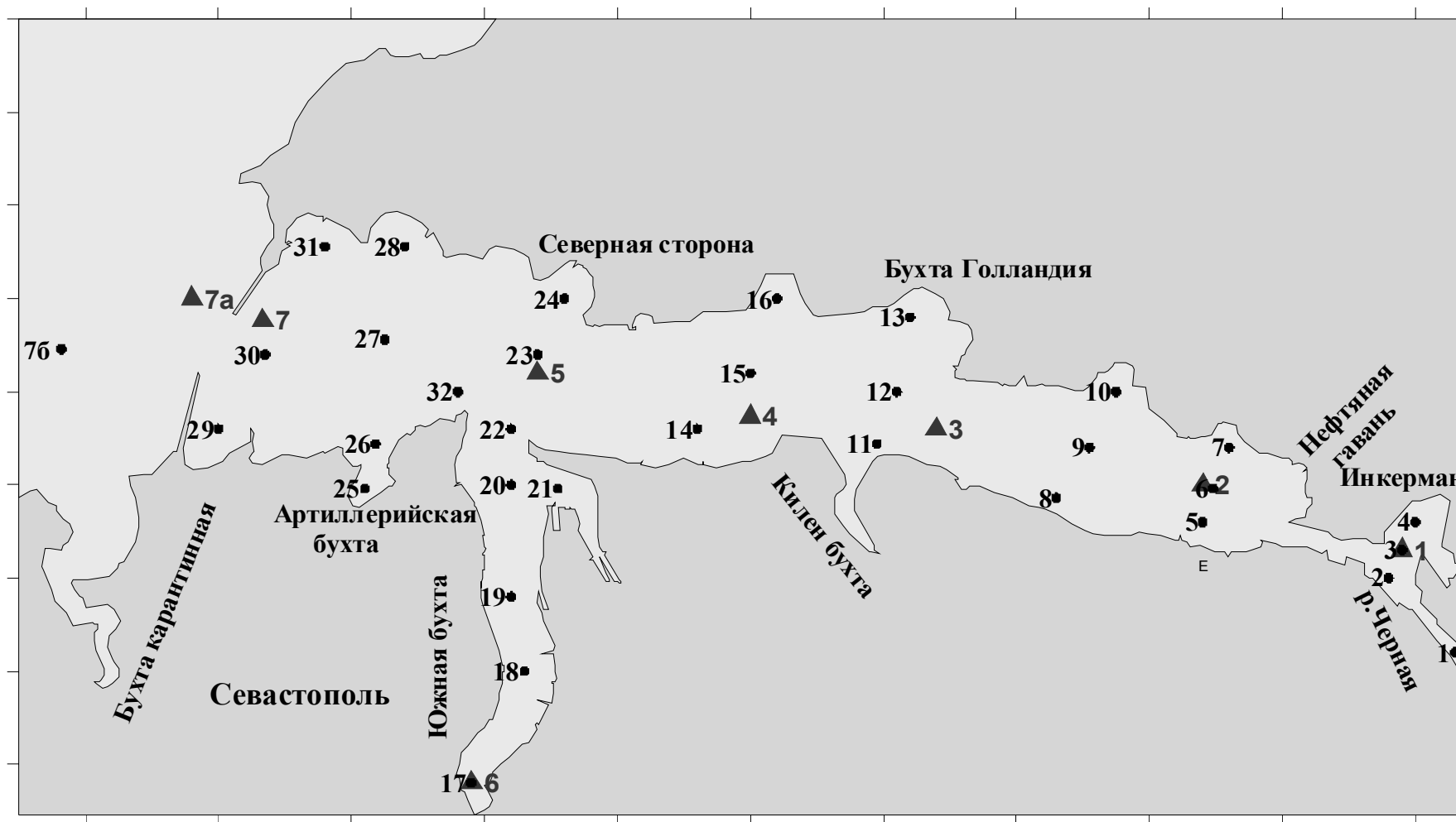


Рис. 1. – Схема станций, выполненных в Севастопольской бухте в 2004-2005 гг. Точками показано положение станций в сезонных съемках (32 станции), треугольниками – положение базовых станций (7 станций).

зарегулированного стока 1954-2000 гг.). Даже в условиях зарегулированного стока р. Черная оказывает большое влияние на полузамкнутую акваторию бухты. При площади Севастопольской бухты $7,62 \text{ км}^2$ величина удельного водосбора (отношение площади водосборного бассейна к площади акватории, принимающей сток) составляет 60. Для сравнения – величина водосбора для всего Черного моря равна 4,5. Это свидетельствует о значительной зависимости акватории бухты от суши, что проявляется в постоянном опреснении поверхностных вод бухты, значительном поступлении с речным стоком аллохтонных органических и минеральных веществ, в том числе биогенных элементов и загрязняющих веществ [14]. Воды реки зарегулированы и используются для питьевого водоснабжения и орошения. Чернореченское водохранилище, построенное в 1956 г. в верхнем течении реки, имеет полный объём $64,2 \text{ млн. м}^3$, площадь зеркала $6,04 \text{ км}^2$.

Хотя влияние речного стока на термохалинную структуру вод несомненно, однако, основным фактором, формирующим циркуляцию вод в бухте, является ветер. При этом изменение пространственного распределения температуры и солености наступает в течение нескольких часов [30,31]. Преобладающие восточные ветры (повторяемость 18%) способствуют выносу вод из бухты, тогда как при южных и юго-восточных ветрах (повторяемость 8-10%) в бухту поступают морские воды [7,11]. Таким образом, интенсивность водообмена определяется в основном сгонно-нагонными явлениями.

Методы исследования и материалы

Гидролого-гидрохимические исследования в Севастопольской бухте выполнялись в течение более пяти лет – с июля 1998 г. по июль 2001 г. и с июля 2003 г по январь 2005 г. Для оценки изменений качества водной среды в процессе выполнения экологического мониторинга измерялись стандартные гидрологические и гидрохимические показатели:

- температура и соленость – измерение *in situ* с использованием СТД-зонда ШИК-1;
- прозрачность - по диску Секки;
- водородный показатель (pH) – потенциометрическим методом;
- общая щелочность – прямым титрованием по Бруевичу;
- содержание растворенного кислорода – по Винклеру;
- минеральные формы биогенных веществ (фосфатов, аммония, нитритов, нитратов, кремнекислоты) – спектрофотометрический метод.

Забортные работы выполнялись с применением СТД-зонда ШИК-1 с кассетой пластмассовых батометров и датчиком кислорода для измерений растворенного кислорода «*in situ*». Технические характеристики каналов температуры, электропроводимости и растворенного кислорода описаны в работе [8]. Химический

анализ проб морской воды на кислород и биогенные элементы выполняли по рекомендованному ЮНЕСКО руководству для программы JGOFS [32]. Минеральные формы биогенных элементов (фосфор, кремний, азот нитратный и нитритный) определялись после фильтрации проб морской воды через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм. Определение общей щелочности и pH выполняли согласно руководства [33]. Хлорофилл определяли флуориметрическим методом по [32].

В качестве исходных данных для расчета элементов карбонатной системы использовались общая щелочность и pH, которые измерялись в день отбора проб. Общая щелочность определялась методом прямого потенциометрического титрования 50 мл морской воды 0,02 М раствором соляной кислоты по Бруевичу [33] с применением высокоточной поршневой бюретки Dosimat 765 фирмы Metrohm (Швейцария). Стандартное отклонение при измерении 10 параллельных проб составляло 0,005 мг-экв/кг. Величину pH определяли с помощью иономера И-130 М с использованием буферных растворов шкалы NBS. Стандартное отклонение при измерении 10 параллельных проб составило 0,02 ед. pH. Расчетным путем определяли: двуокись углерода (CO_2), её парциальное давление ($p\text{CO}_2$), концентрации карбонатных (CO_3^{2-}) и гидрокарбонатных (HCO_3^-) ионов.

Для расчета элементов карбонатной системы использовались константы угольной кислоты, рекомендованные отделом морских наук ЮНЕСКО [34]. При этом предполагалось, что бор является консервативным элементом, а его содержание пропорционально солености. Поэтому содержание бора рассчитывалось по солености согласно рекомендациям [35]. Зависимость констант диссоциации борной и угольной кислоты от давления, а также влияние диссоциации воды, фосфорной и серной кислот, также как плавиковой и других кислот, присутствующих в малых концентрациях в морской воде, на величину щелочности не учитывалось.

В начале гидролого-гидрохимического мониторинга в 1998 г. для сохранения возможности использования архивных данных работы проводились на сетке станций, которая традиционно сложилась при выполнении гидробиологических работ, а также программы ОГСНК – разрез из пяти стаций по оси бухты и одна станция в Южной бухте. В дальнейшем (с 2000 г.) для выполнения наблюдений с повышенной пространственной и временной дискретностью была разработана схема станций экологического мониторинга, которая позволила выявить основные закономерности распределения и режима гидролого-гидрохимических показателей в Севастопольской бухте. При этом ежемесячные съёмки выполнялись по ранее используемой схеме из семи «базовых» станций, а квартальные – по полной схеме (33 станции в бухте). При выборе сети станций исходили из

особенностей гидрологической структуры вод бухты и локализации источников загрязнения. В период исследования 2004-2005 гг. гидролого-гидрохимические съёмки Севастопольской бухты выполнялась один раз в квартал – по принятой оптимизированной схеме станций – 33 станции, из них одна – у входа в бухту с мористой стороны (рис.1). Гидробиологические работы выполнялись синхронно с гидролого-гидрохимическими. При исследовании изменчивости гидролого-гидрохимических показателей в придонных слоях вод анализировалось их содержание на горизонте закрытия батометров в одном метре от дна.

Согласно современным представлениям о солёности как о безразмерной величине и рекомендациям ЮНЕСКО в настоящей работе не используется размерность «промилле», а гидрохимические показатели в основном представлены в молярных концентрациях в соответствии с требованиями государственных нормативных документов [36].

При обработке результатов наблюдений использовались стандартные программы ПК IBM. Построение карт выполнялось при помощи графического пакета прикладных программ «Surfer Access System». Для оценки связей между гидрологическими, гидрохимическими и биологическими показателями использовали метод линейной корреляции. При оценке экологического состояния бухты для районирования акватории использовался дискриминантный функциональный анализ.

Экологическое состояние: абиотические факторы и источники загрязнения бухты, масштаб и характер антропогенного воздействия.

В исторически сложившейся системе природопользования прибрежная морская среда, и в первую очередь – Севастопольская бухта, всегда занимала важное место в экономике региона, хотя значимость и экономический вес отраслей (рыболовство и марикультура, портовое хозяйство, судостроение и судоремонт, туризм и рекреация и пр.) с течением времени изменялись. Но и в настоящее время Севастопольская бухта относится к числу акваторий активного хозяйственного использования. Это торговый морской порт с портовым хозяйством и причальными стенками, общая длина которых составляет около 11 км, сухогрузным и нефтяным терминалами. Бухта является местом базирования военно-морского и пассажирского флотов. На берегах бухты расположена историческая часть города Севастополь, население которого в настоящее время составляет около 380 тыс. чел., а также целый ряд промышленных предприятий судоремонтной и судостроительной отраслей. Непосредственно в прибрежной зоне расположена ТЭЦ, а в устье р.Черной – предприятие по судоразделке «Крымвтормет» и ряд других предприятий и воинских частей.

Бухта фактически используется как отстойный резервуар, в который поступают хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды, а также неочищенные ливневые воды с площади водосбора, где основной составляющей является селитебная и промышленная зоны. Непосредственно в бухту сточные воды поступают по более тридцати выпускам – временным и постоянно действующим. Ежедневно в бухту сбрасывается порядка 10 тыс. м³ неочищенных и условно-чистых вод, с которыми в морскую воду попадает широкий спектр ЗВ с концентрациями, превышающими допустимые нормы. Несмотря на то, что основная часть вод зарегулированного стока р.Черной используется для питьевого водоснабжения, ЗВ поступают в бухту и с речными водами, поскольку как в верховье реки, так и в нижнем течении происходит сброс хозяйственно-бытовых сточных вод.

Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона, а также предварительная оценка масштаба и характера загрязнения даны в работе [14]. Хотя изученность целого ряда значимых источников загрязнения в настоящее время недостаточна, рассмотрим их кратко в части, касающейся Севастопольской бухты.

Речной сток. Воды реки Черной относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальция (по классификации О.А. Алекина). По данным наблюдений сети Гидрометслужбы за 1986-2000 гг. [37], минерализация (сумма ионов) воды колеблется в пределах 320-1110 мг/дм³. Величина и изменчивость минерализации связана с водным режимом и источниками питания реки. Минимальные значения минерализации приурочены к зимнему периоду, когда преобладает "атмосферное" питание бассейна стока. За период с начала сетевых наблюдений (30-е годы XX в.) минерализация речной воды увеличилась почти вдвое, а максимальные значения близки к допустимой санитарно-гигиенической норме (1000 мг/дм³). Воды реки Черной являются основным источником питьевого водоснабжения г. Севастополя. В этой связи бассейн реки находится в области действия "Положения о водоохранной зоне". В то же время речные воды содержат весьма значительные количества биогенных веществ. В водах, поступающих в бухту с речным стоком, максимальные концентрации биогенных элементов выше, чем в морской воде: аммония - в 5-7 раз, нитритов - в 1,5-2 раза, нитратов - в 1,6 раза, фосфатов - в 7-9 раз.

Средние концентрации загрязняющих веществ (фенолы, СПАВ, нефтепродукты) в речной воде в основном не превышают предельно допустимых концентраций (ПДК), хотя в отдельных случаях отмечается превышение ПДК аммония и нитритов. Ежегодно с речными водами в бухту поступает не менее 1000 т взвешенного вещества, 52 т минерального азота и 6 т фосфора. Полученные значения, вероятно, занижены, так как ниже замыкающего створа (п. Хмельницкое), расположенного на расстоянии 11 км от

устья, имеются источники значительного загрязнения речных вод. Для оценки и учета фактического загрязнения, поступающего с речным стоком, необходима организация регионального мониторинга нижнего течения реки Черной.

Коммунальные и промышленные стоки. Постоянным источником загрязнения вод бухты являются сточные воды, поступающие по канализационным сетям КП «Севгорводоканал». По данным Государственной инспекции охраны Черного и Азовского морей в настоящее время в севастопольской бухте функционируют более 30 выпусков сточных вод, ливневой канализации и аварийных выпусков, из них около 20 постоянно действующих. Ежегодно в бухту сбрасывается более 2 млн. м³ неочищенных сточных вод. Аварийные выпуски и ливневые стоки составляют около 1,5 млн. м³ в год. По оценке Государственной инспекции по охране Черного моря, поступившее в прибрежные воды Севастопольского региона за период с 1995 по 2000 гг. среднегодовое количество биогенных элементов и некоторых ЗВ составило: фосфатов - 780 т, нитратов - 6,5 т, нитритов - 2,5 т, нефтепродуктов - 10 т, СПАВ - 65 т. Оценка выполнена по результатам анализа проб морской воды, которые отобраны в зонах влияния выпусков сточных вод. Кроме того, в бухту со сточными водами поступают тяжелые металлы, пестициды, фенолы и другие ЗВ.

Ливневые стоки. Систематического исследования состава ливневых вод, поступающих в Севастопольскую бухту, не проводилось. Экспертная оценка, а также расчеты, основанные на единичных анализах ливневых вод одного из районов Севастопольского региона, указывают на значительную роль этого источника в загрязнении морской среды бухты. По нашей оценке с 1 км² площади городской застройки в Севастопольскую бухту ежегодно поступает: 1,2 т нефтепродуктов, 1680 т взвеси, 21,5 кг фосфора, 47,6 кг нитратного азота. Данная оценка является ориентировочной и, возможно, занижена. Для корректной оценки вклада ливневых стоков в поставку ЗВ в прибрежные морские воды крайне необходима организация мониторинга этого источника загрязнения. Такой мониторинг необходим не только для оценки экологического состояния прибрежной морской среды, но и в качестве исходной информации при проектировании системы сбора и очистки вод ливневой канализации, которая в Севастополе отсутствует. При организации мониторинга предметом контроля должна быть не только селитебная зона, но и природоохранные береговые зоны, а также водосборные площади рек, под влиянием стока которых находятся прибрежные воды Севастопольского региона.

Загрязнения от судоходства и базирования морского флота. Использование Севастопольской бухты для базирования судов военно-морского флота Российской Федерации и ВМС Украины, функционирования торгового и пассажирского флотов, а также наличие предприятий судостроения и судоремонта выдвигают на первый план необходимость защиты данной акватории от загрязнений. Проблема состоит в том, что корабли и суда всевозможных типов не оборудованы закрытыми системами для сбора нефтесодержащих вод, хозяйственно-бытовых стоков и отходов жизнедеятельности. Количество имеющихся технических средств для сбора и переработки льяльно-балластных вод недостаточно. В регионе имеются всего две станции, принадлежащие ЧФ РФ и СП «Югторсан». Поэтому основная масса льяльно-балластных вод сбрасывается в бухту без очистки. Ежедневно с каждого борта сливается за борт от 2,5 до 6 м³ сточных вод. В результате, в морскую воду попадают нефтепродукты и другие ЗВ. По оценке Министерства экологии и природных ресурсов Севастопольская бухта в 1995-1996 гг. относилась к числу акваторий с максимальным загрязнением нефтепродуктами (4-5 ПДК). По данным Государственной инспекции охраны Черного моря в 2000 г. в Севастопольской бухте повторяемость концентраций углеводородов, превышающих ПДК, составила 90%.

Загрязнения, поступающие из атмосферы. Загрязнения из атмосферы попадают в бухту как из локальных источников (котельные, автотранспорт, промышленные предприятия), так и в результате трансграничного переноса. Наблюдения за химическим составом атмосферных осадков в районе Севастополя показывают, что с атмосферными выпадениями в морскую акваторию поступают тяжелые металлы, нефтепродукты, пестициды и другие ЗВ в концентрациях, сопоставимых с величинами, обнаруженными в воде Севастопольской бухты. Так, в летний сезон 1993 г. за 6 дождевых дней на 1 км² поверхности в районе Севастополя поступило 560 г нефтяных углеводородов, 1390 г цинка, 840 г меди, 300 г никеля, 45 г марганца, 13 г кадмия, 0,15 г ртути, 260 мг пестицида гексахлорциклогексана, 400 мг полихлорбифенила (рассчитано по данным работы [3]). При дальнем атмосферном переносе на поверхность моря в Севастопольском регионе поступает в кг/км²·год: азота нитратного - 139, азота аммонийного - 730, цинка, хрома, меди – по 1,5; никеля – 1,3; марганца - до 2,5. Основная доля загрязнений обеспечивается, вероятно, переносом с преобладающими ветрами северных направлений. Приведенные данные свидетельствуют о значительной роли атмосферных выпадений в загрязнении акватории и поверхности суши Севастопольского региона. Для корректной оценки загрязнений из атмосферы необходим длительный мониторинг.

Загрязнение в результате рекреационного использования прибрежной зоны. Влияние на морскую среду рекреационного комплекса наиболее существенно проявляется при сбросе стоков канализационными сооружениями лечебно-оздоровительных учреждений, а также в результате перенаселения городских пляжей отдыхающими в летний сезон. В Севастопольской бухте официально действующим является пляж на мысе Хрустальном. Кроме того, в Артиллерийской бухте в летний период функционирует океанариум морских животных. Было установлено, что воды пляжной зоны и зоны океанариума в летний период характеризуются повышенным содержанием соединений азота (аммонийного и нитратного).

Пляжи и набережные являются постоянным источником загрязнения прибрежных вод хозяйственно-бытовым мусором. Основным компонентом мусора в море являются различные пластмассы бытового назначения. По данным наблюдений, проведенных Институтом биологии южных морей НАН Украины в 1998-2002 гг., загрязненность пластиковым мусором береговой зоны Севастопольского региона весьма высока (более 0,5 кг на 1 м берега) и превышает среднеевропейскую [38]. При постоянном росте употребления пластмасс, низком уровне утилизации пластмассовых отходов и многофакторном характере их негативного влияния на окружающую среду, проблема «пластиковой чумы моря» становится весьма актуальной.

Таким образом, пляжные зоны в период их использования являются источником постоянного загрязнения прибрежных вод. Данных для объективной оценки масштаба загрязнения и его специфики в настоящее время недостаточно. В дальнейшем требуется совершенствование мониторинга.

Гидрометеорологические условия и термохалинная структура вод

Распределение основных гидролого-гидрохимических параметров вод Севастопольской бухты характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью, которая во многом определяется метеорологическими и гидрологическими условиями в бухте и прилегающем к ней районе Черного моря. Исследования показали, что гидрометеорологический режим Севастопольской бухты является важнейшим фактором формирования экосистемы полужакрытой акватории, подверженной антропогенному воздействию [7, 11].

Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты определяется также интенсивностью её водообмена с сопредельной акваторией Черного моря, особенностями циркуляции вод внутри бухты, режимом стока р.Черной и поступлением сточных вод. Экологическое состояние бухты формируется в условиях постоянно увеличивающегося

антропогенного воздействия. Основными актами этого воздействия являются: зарегулирование речного стока Чернореченским водохранилищем, сокращение водообмена в результате искусственного сужения входного створа и, в связи с этим, увеличение времени "полного" обмена вод в бухте, а также увеличение объема сточных вод. Поэтому в бухте отмечается избыточное количество биогенных элементов (фосфатного фосфора, минеральных форм азота), которое на порядок превышает среднее содержание, наблюдаемое в открытых районах Черного моря, а также дефицит кислорода в придонном слое, повышенные значения общей взвеси, pH и общей щелочности. Сезонные пределы изменений гидрологических и гидрохимических параметров и их средние величины приведены в таблице 1.

Гидрометеорологические условия.

Метеорологические и океанографические факторы оказывают важное влияние на перенос, распространение, изменение концентрации и рассеяние химических и загрязняющих веществ, поступающих в бухту из различных источников. Поэтому, при анализе пространственной и временной изменчивости химических показателей вод Севастопольской бухты необходимо учитывать межгодовые и сезонные вариации гидрометеорологических параметров, а также особенности погодных и гидрологических условий, предшествовавших выполнению конкретных гидролого-гидрохимических съемок.

В течение периода интенсивного мониторинга состояния вод Севастопольской бухты (1998-2004 гг.) происходили заметные межгодовые колебания температуры воздуха и воды, осадков, скорости ветра и уровня моря. Одним из основных климатических показателей является *температура воздуха*, которая зависит от радиационных условий, сезонных колебаний циркуляции атмосферы и физико-географических особенностей района, в данном случае, Севастопольской бухты. Температура воздуха является одним из определяющих факторов температурного режима вод бухты, от которого, в свою очередь, зависит формирование и эволюция полей растворенного в воде кислорода и других химических показателей вод бухты.

Самыми теплыми оказались 1999 и 2002 годы, когда среднегодовые величины температуры воздуха, соответственно, 13,5 и 13,2°C (рис.2а), существенно превышали среднемноголетнее значение для Севастополя (12,1°C). Среднегодовая температура самого холодного 2003 г. – 12,0 °C была ниже этого значения.

Таблица 1.

Сезонные пределы изменений и средние значения абиотических параметров Севастопольской бухты
за период с мая 1998 г по январь 2005 г

Сезон, месяцы	Горизонт, м	Температура, °С	Соленость,	Кислород		рН, ед. рН	Щелочность, мг-экв/л
				мл/л	% насыщения		
Весна (III-V)	поверхность	10,45-17,70	14,36-17,95	6,58-7,61	102,5-122,0	8,29-8,44	3,255-3,500
	(0-1м)	13,00	17,53	7,30	110,0	8,40	3,350
	придонный	8,67-15,49	17,43-18,10	5,19-7,62	79,6-111	8,17-8,42	3,290-3,355
		11,26	17,91	6,75	98,7	8,32	3,344
Лето (VI-VII)	поверхность	19,00-28,14	12,95-17,80	5,05-15,16	94,4-294	8,15-8,91	3,271-3,580
	(0-1м)	23,55	17,34	6,28	114,0	8,35	3,310
	придонный	10,16-26,84	16,79-18,37	1,40-7,99	26,9-126	7,91-8,49	3,225-3,391
		18,29	17,79	5,50	92,5	8,26	3,300
Осень (IX-XI)	поверхность	10,13-21,81	12,88-18,04	3,68-7,28	71,0-130	8,23-8,60	3,180-3,391
	(0-1м)	16,90	17,45	5,60	91,6	8,35	3,310
	придонный	10,13-21,26	17,12-18,14	2,96-6,86	52,0-105	8,24-8,57	3,180-3,394
		16,62	17,78	5,13	83,6	8,35	3,300
Зима (XII-II)	поверхность	6,33-8,21	16,56-17,99	5,76-7,64	74,9-101	8,15-8,46	3,323-3,757
	(0-1м)	7,55	17,68	6,94	92,5	8,40	3,354
	придонный	7,23-8,50	17,82-18,16	5,58-7,23	75,5-97,7	8,31-8,44	3,297-3,677
		7,82	18,05	6,68	89,8	8,39	3,333

Таблица 1 (продолжение)

Сезон, месяцы	Горизонт, м	Фосфаты, мкМ	Кремний, мкМ	Аммонийный азот, мкМ	Нитраты, мкМ	Нитриты, мкМ	Общая взвесь, мг/л
Весна (III-V)	поверхность (0-1м)	0-1,60	0,6-14	0,09-7,26	0,19-61	0,02-5,06	1,1-49
		0,11	2,7	1,10	7,6	0,85	6
	придонный	0-0,26	0,6-7,1	0,30-2,66	0,0-12	0-1,88	1,4-15
		0,07	3,0	0,90	1,1	0,16	4
Лето (VI-VII)	поверхность (0-1м)	0-2,26	0,4 -9,1	0-8,50	0,02-76	0-0,79	0,3-5
		0,12	3,3	0,60	4,5	0,07	2
	придонный	0-0,81	0,3-13	0,0-5,93	0-27	0-0,84	1,8-6
		0,09	4,8	1,32	1,1	0,09	3
Осень (IX-XI)	поверхность (0-1м)	0-0,99	0-15	0-5,12	0,06-51	0-0,77	1,1-12
		0,27	4,9	1,17	6,5	0,31	3
	придонный	0-0,77	0-12	0,11-3,92	0,31-10	0,03-0,96	1,4-11
		0,13	5,6	1,36	2,9	0,25	4
Зима (XII-II)	поверхность (0-1м)	0-1,23	1,9-65	0-4,11	1,3-141	0,0-1,48	1,3-3
		0,15	5,6	0,42	12	0,30	2
	придонный	0-0,49	2,1-9,1	0-1,85	1,8-13	0,04-0,38	0,8-1,9
		0,10	4,0	0,37	5,2	0,23	1

Соответственно, в эти же годы *температура воды* (рис.2а) имела среднегодовые экстремумы, которые более чем на градус превышали среднемноголетнюю величину 14,4°C.

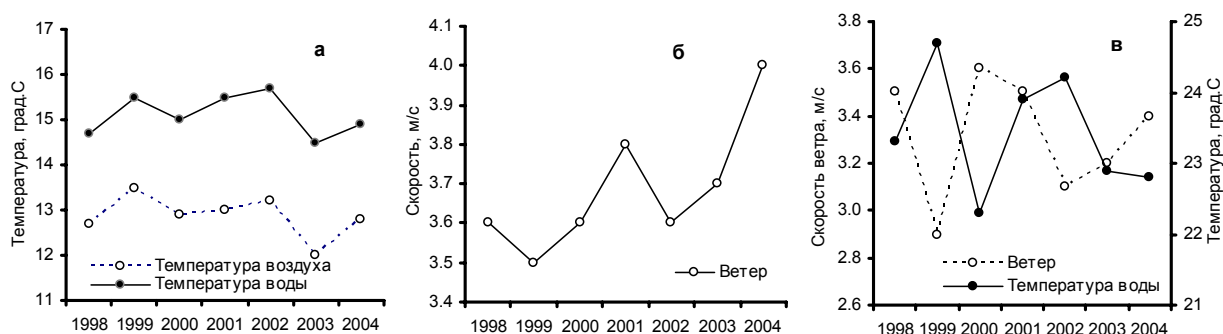


Рис. 2. Изменения среднегодовых величин температуры воздуха и воды (а), скорости ветра (б), средних за лето (VI-VIII) значений скорости ветра и температуры (в) вычисленных по данным наблюдений на МГ Севастополь

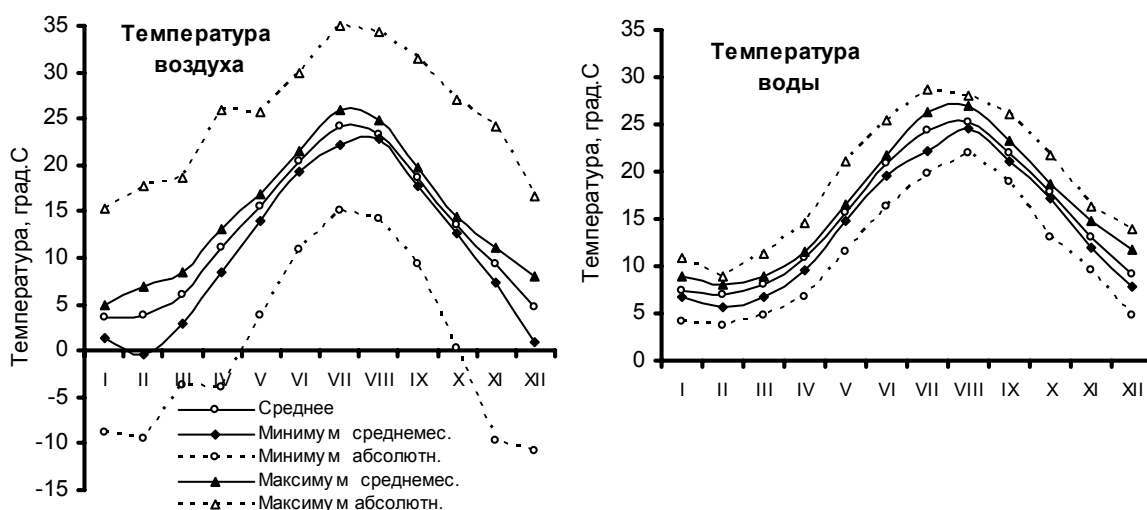


Рис. 3. Внутригодовой ход средних и экстремальных значений температуры воздуха и воды. МГ Севастополь

При сопоставлении межгодовых изменений температуры воды (рис.2а) и скорости ветра (рис.2б) хорошо заметны противофазовые колебания, которые подтверждают известную закономерность повышения температурного фона при ослаблении ветровой активности, и наоборот. Особенно ярко эта закономерность проявляется в летние периоды (рис.2в), когда интенсивность гидролого-гидрохимических исследований Севастопольской бухты была максимальной. Как будет показано ниже, именно в годы с жаркими, маловетренными летними сезонами из-за ослабления динамических процессов обостряются негативные для экосистемы явления. В частности, явления гипоксии отмечались в придонных слоях бухты, когда насыщение вод кислородом было менее 50%.

В такие сезоны среднемесячные температуры воздуха достигали 26 °С (абсолютные – 35°С), а температуры воды – 27 °С (абсолютные 28,6 °С, рис. 3).

В годы с относительно прохладным летом аналогичные величины температуры воздуха и воды у берега не превышали 23,0 и 24,6 °С соответственно. Внутригодовые изменения величин температуры воздуха и воды, вычисленных за период мониторинга, представлены на рис.3.

Значительное влияние на изменения экологических условий, т.е. на распределение загрязненных вод по акватории Севастопольской и Южной бухт оказывают также **режим ветров** и связанная с ним динамика вод в бухтах. В свою очередь ветровой режим во многом зависит от рельефа берегов, в частности, от вытянутости Севастопольской бухты, окруженной относительно высокими берегами, в зональном направлении, а Южной бухты – в меридиональном. Вследствие этого преобладающие над прибрежной зоной моря северные, северо-восточные ветры и южные, юго-восточные ветры [7] трансформируются над акваторией бухты, соответственно, в северо-восточные, восточные (36%) и южные (20%) ветры (рис. 4).

Вероятно, поэтому неблагоприятная ситуация в Южной бухте складывается в случае, когда в периоды адвекции морских вод действуют ветры северного и восточного секторов, которые способствуют очищению Севастопольской бухты, но запирают загрязненные воды в Южной бухте. Под влиянием сильных и продолжительных ветров южных направлений создается противоположная ситуация, когда из Южной бухты загрязненные воды сгоняются и аккумулируются в основной части Севастопольской бухты. В среднем за период мониторинга преобладали ветры северных, северо-восточных и восточных направлений, поэтому экологические условия в Южной бухте на протяжении длительного времени остаются наиболее неблагоприятными. Максимальной

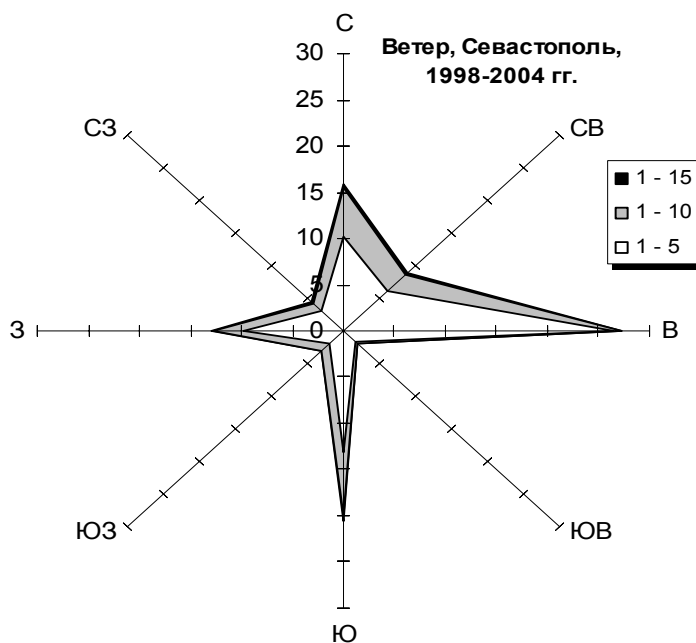


Рис. 4. Роза повторяемости (%) ветров по направлениям и градациям скорости по данным МГ Севастополь

скорости (15-16 м/с) штормовые ветры достигали, в основном, в холодный период (ноябрь-март), однако и летом скорости ветра нередко превышали 12-13 м/с. Изменения

среднемесячных величин скорости ветра на станции Севастополь (рис. 5) показывают, что в период мониторинга наиболее ветренным был февраль, а в летние и осенние месяцы отмечались периоды усиления до 4-5 м/с и ослабления ветровой активности до минимальных значений (2,1-2,4 м/с).

Важным фактором экологического состояния является характер водообмена Севастопольской бухты, который связан со стоком р.Черная, а также с изменениями водного баланса Черного моря, проявляющимися в годовых и сезонных колебаниях *уровня воды* в бухте. За семилетний период мониторинга общая амплитуда колебаний среднегодовых величин уровня воды составила 10 см, при этом минимум, равный среднемноголетней отметке (479 см) наблюдался в 2003 г., а максимум (489 см) был отмечен в 1999 г. (рис. 6). Как было показано в [11], подобные изменения годовых величин уровня могут означать, что при относительно высоких уровнях в 1999, 2002 и 2004 гг. преобладала адвекция морских вод в бухту, повлиявшая на улучшение экологических условий. В остальные годы, в особенности в 2003 г., при интенсивном понижении уровня преобладают сток вод из Севастопольской бухты, замедление

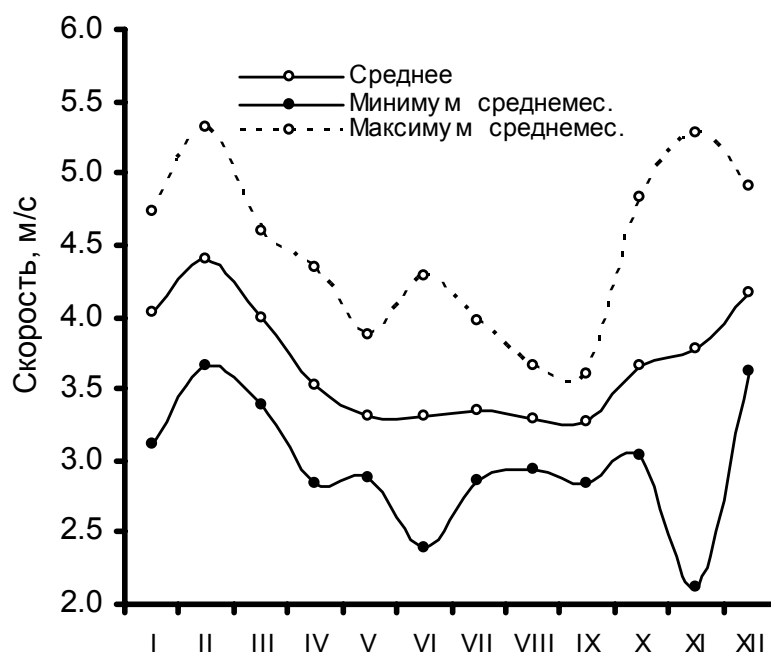


Рис. 5. Внутригодовой ход среднемесячных величин скорости ветра

водообмена, аккумуляция загрязняющих веществ и определенное ухудшение экологической обстановки.

Внутригодовые колебания уровня в бухте более подробно показывают различия в вариациях водности бухты и тенденции их сезонных изменений (рис. 7). В сезонном ходе

большей части лет периода мониторинга проявляются традиционные изменения уровня с максимумом в весенне-летний сезон и минимумом осенью (1998, 1999, 2000, 2001 и 2004). Из них выделяются 1998 и 1999 гг. В 1998 г. отмечался аномально высокий зимний (январь-февраль) уровень за счет обильных осадков 1997 г. и аварийных сбросов Чернореченского водохранилища, вызвавших распреснение вод бухты. В 1999 г. летний подъем уровня происходил в результате интенсивной адвекции морских вод, положительно повлиявшей на химический состав и качество вод бухты. Приток вод из Черного моря способствовал проникновению в бухту зоопланктона и заходу на нерест пелагических рыб. Практически во всех частях бухты, включая вершинные, зарегистрировано увеличение биомассы зоопланктона и численности ихтиопланктона [11].

В противоположность таким годам выделяются 2002 г. с необычно высоким уровнем в осенний период из-за обильных осадков в августе-октябре и совершенно аномальный 2003 г., в течение большей части которого происходило интенсивное понижение уровня моря (засушливое лето в Европе).

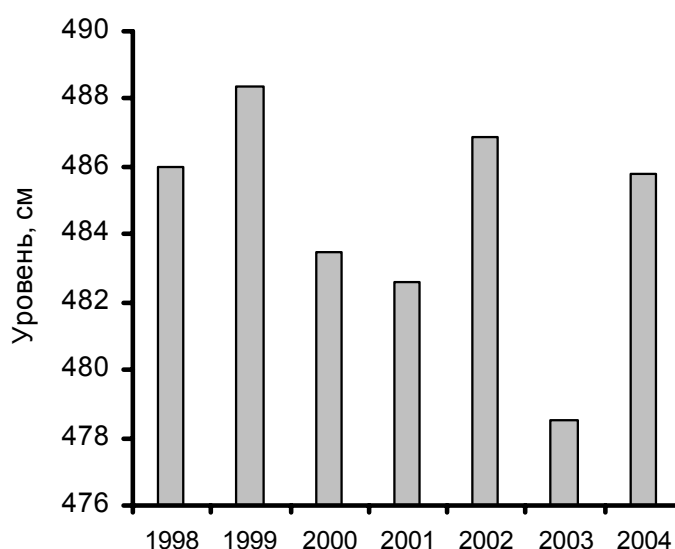


Рис. 6. Среднегодовые величины уровня воды. МГ Севастополь

Обычный весенне-летний максимум в этом году отсутствовал, а наибольшие уровни были отмечены зимой и осенью. На состояние вод бухты в 2003 г. повлияли также интенсивные апвеллинги у побережья Крыма и пониженная температура воздуха (рис.2а).

Наряду с техногенным загрязнением, важным антропогенным фактором являются искусственные экстремальные сбросы воды Чернореченского водохранилища и связанное

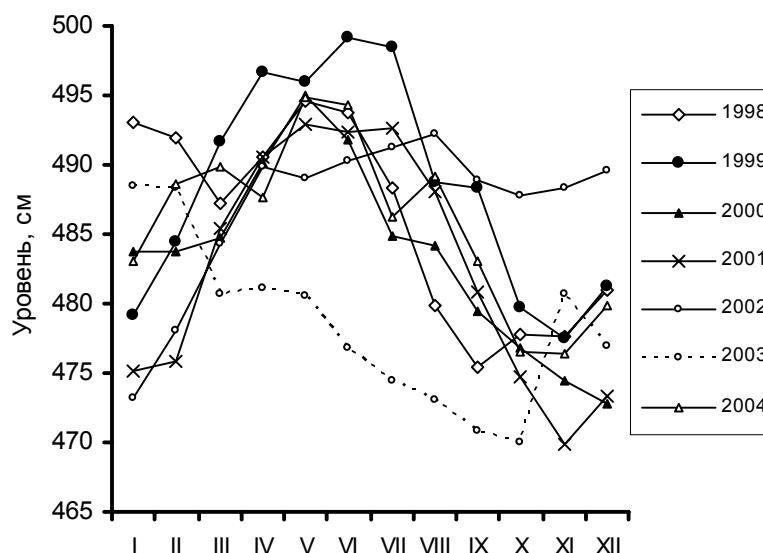


Рис. 7. Годовые изменения среднемесячных величин уровня воды в Севастопольской бухте.

с ними интенсивное распреснение вод бухты. Минимальные объёмы стока зарегулированной водохранилищем реки Черной, наоборот, способствуют усилению адвекции морских вод в бухту. В результате взаимодействия поступающих в бухту вод, их перемешивания ветровыми и стоковыми течениями формируются воды собственно бухты. Свойства этих вод и величина антропогенного влияния изменяются в тесной зависимости от соотношения объёмов поступающих в бухту пресных (речных, сточных, атмосферных) или соленых (морских) вод. Таким образом, основными абиотическими факторами, определяющими естественные свойства вод Севастопольской бухты, являются сток пресных вод р. Черной в восточную часть бухты и приток соленых морских вод, заполняющих бухту через входной пролив в её западной части. От регулирования стока р. Черной Чернореченским водохранилищем, хозяйственно-бытовых и ливневых стоков города зависит количество и концентрации загрязняющих веществ. Наряду с этим, циркуляция вод, стонно-нагонные явления, перемешивание, турбулентная диффузия являются важнейшими условиями, определяющими процессы самоочищения морских вод от техногенного загрязнения [29].

Основным фактором, формирующим течения в бухте, как и в сопредельной прибрежной части моря, является ветер, работы которого на протяжении нескольких часов достаточно для установления определенного типа циркуляции. На основании анализа гидрометеорологических условий в период проведения мониторинга, съёмок течений в бухте в предшествующие периоды, а также опубликованных данных [7, 11, 39], определены следующие особенности циркуляции, влияющей на перераспределение естественных свойств и антропогенных примесей в водах Севастопольской бухты.

Под влиянием преобладающих над акваторией бухты восточных ветров формируется поверхностное дрейфовое течение, направленное вдоль бухты с востока на запад. Измеренные скорости течения на выходе из бухты достигали 40 – 60 см/с, в средней части они составляли 10 – 15 см/с, в вершинной 4 – 6 см/с. В придонном слое через входной пролив в бухту поступают более соленые морские воды, которые распространяются с запада на восток. Этот поток активизируется за счет компенсационного эффекта при усилении поверхностного течения на запад. Высокосоленые морские воды распространяются вглубь бухты и, достигая иногда устья р. Черной, подпирают речные воды. Здесь, например, отмечался выход на поверхность вод с соленостью 18,03, которая соответствует глубинным морским водам.

При ослаблении восточных ветров и усилении ветров западной половины горизонта адвекция морских вод в бухту может охватывать всю толщу от поверхности до дна. При воздействии южных ветров западное поверхностное течение смещается к северному побережью, при этом вдоль южного берега активизируется адвекция в бухту более соленых морских вод, которая сопровождается подъёмом термогалоклина. Поступающие через входной пролив морские воды распространяются также в Южную бухту, запирая воды её вершинной части и затрудняя их водообмен с Севастопольской бухтой. Усиление ветров с меридиональной составляющей нарушают зональный перенос в бухте. Наиболее часто повторяющиеся штормовые ветры северных, северо-восточных и южных направлений способствовали локализации объёмов сформировавшихся во внутренних частях бухты поверхностных распресненных (наиболее загрязненных) вод. Эти трансформированные воды вытеснялись из вершинной части также в результате подъёма придонных вод под воздействием сгонных эффектов.

Линзы с аномальными значениями температуры и солености отмечались в средней части бухты и у входа в Южную бухту. Такие медленно смещающиеся к выходу из бухты динамические структуры, вероятно, сдерживают процессы водообмена как между отдельными районами бухты, так и между бухтой и морем. Таким образом, антициклонические динамические структуры с конвергенцией в центре и подъёмом изоповерхностей на периферии могут подпереть морские воды в суженном молами входном проливе и препятствовать свободному водообмену бухты с морем [11]. Подобные особенности динамики вод бухты отмечены в осенне-зимний штормовой период, когда ослабление стратификации вод приводит к неустойчивости динамических процессов. Математическое моделирование ветровых течений в этом районе также показало возможность формирования в Севастопольской бухте вихревых структур с зонами подъёма и опускания вод [39].

Термогалинная структура вод

Межгодовая и внутригодовая изменчивость перечисленных гидрометеорологических факторов определяла особенности процессов формирования и эволюции *термогалинной структуры* вод Севастопольской бухты в течение семилетнего периода мониторинга. В качестве индикатора этих особенностей использовалась соленость воды как наиболее консервативная характеристика. Материалом для исследования изменчивости послужили вычисленные по данным съемок и разрезов средние значения для всей бухты и отдельно – для станции у выхода из бухты (ст. 7) и станций в вершинных частях Южной (ст. 6) и Северной (ст. 2) бухт (рис. 1). В качестве параметра, характеризующего тенденцию водообмена бухты, использовалась изменчивость среднемесячных величин уровня воды в Севастопольской бухте [11].

Наиболее важным фактором, повлиявшим на состояние вод бухты в 1998 г., было поступление экстремально больших объемов стока речных вод. Обильные осадки в 1997 г. и интенсивное таяние снега весной 1998 г. вызвали переполнение Чернореченского водохранилища. За шесть месяцев в Севастопольскую бухту было сброшено свыше 0,096 км³ пресной воды. Из них 0,053 км³ поступило за период с февраля по апрель 1998 г. Если учесть, что средний объем воды в бухте составляет ~ 0,079 км³, то станет очевидным, насколько сильное распреснение вод бухты было весной и летом 1998 г. Интенсивное поступление речного стока привело к общему понижению солености вод бухты. В июне 1998 г. соленость в поверхностном слое вершинной части Севастопольской бухты уменьшилась до 12,9. В Южной бухте (ст. 6) и на выходе из Севастопольской бухты (ст. 7) она снизилась до 16,3. Таким образом, активное поступление в бухту речных вод в первой половине 1998 г. сопровождалось стоком вод (понижение уровня воды) и отдельными случаями адвекции морских вод в бухту. В сентябре 1998 г. уровень воды в бухте понизился до минимальных отметок и до января 1999 г. изменялся незначительно (рис. 8).

Пять съемок, выполненных с сентября по январь, показали, что в этот период относительно стабильной динамики при слабых ветрах в районе входа в Севастопольскую бухту была расположена фронтальная зона. Область повышенных горизонтальных градиентов с вертикальным положением изолиний термогалинных характеристик и кислорода образовалась непосредственно в створе входного пролива. Она разделяла относительно распресненные (17,7-17,8), перенасыщенные кислородом (до 116 %) воды бухты от морских вод с соленостью 17,9-18,0 и насыщением кислорода <104 %. В этот период началось медленное повышение уровня воды в бухте за счет поступления морских вод при минимальном речном стоке. В октябре-ноябре 1998 г., в период ослабления

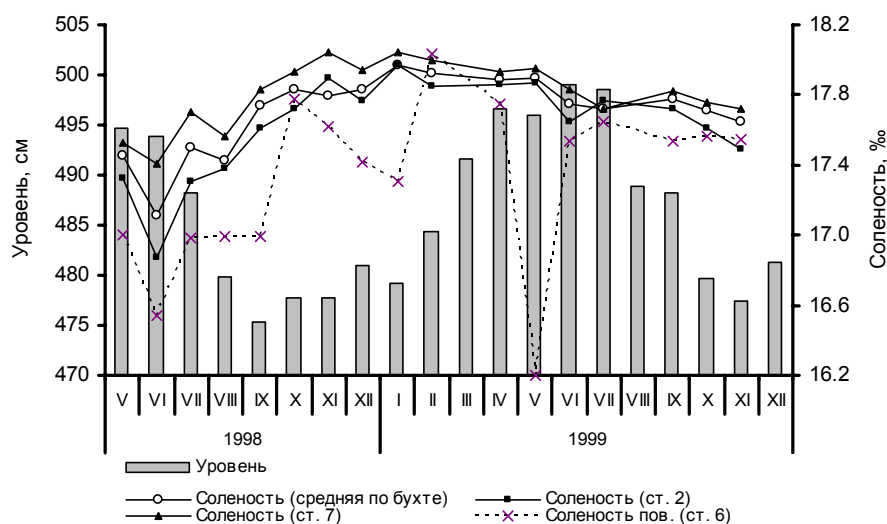


Рис. 8. Изменение средних месячных величин уровня воды и солёности в Севастопольской и Южной бухтах в 1998-1999 гг.

водообмена, когда стоковые течения прекратились из-за усиливающегося подпора морских вод и сокращения речного стока, под влиянием осенних штормовых ветров в центральной части бухты сформировалась динамическая структура с антициклонической завихренностью и ядром в виде линзы из распресненных до 17,46 вод (рис. 9).

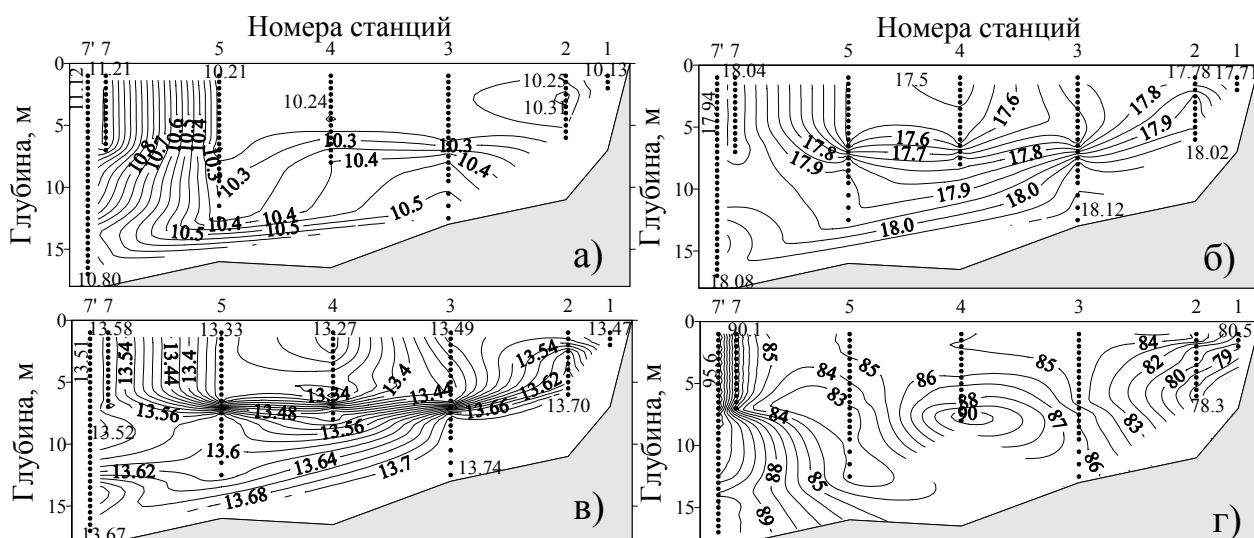


Рис. 9. Распределение температуры воды (а), солёности (б), условной плотности (в) и насыщения кислородом (г) на разрезе вдоль Севастопольской бухты в ноябре 1998 г

На периферии этой структуры, перед выходом из бухты и в проливе располагалась область высоких горизонтальных градиентов температуры, солёности, плотности и растворенного кислорода (рис. 9 а-г). Наличие интенсивной дивергенции вод в предпроливном районе подтверждается подъёмом на поверхность придонных вод с повышенной плотностью и солёностью до 18,04, максимальной за период мониторинга

(рис. 9б). Динамическая структура и фронтальная зона препятствовали свободному

водообмену через суженный молами

вход в бухту, о чем свидетельствует

относительно стабильное положение

уровня воды в бухте в октябре-ноябре

1998 г. (рис.8). Тем не менее, в

нижнюю половину бухты поступали

морские воды с повышенной по

отношению к поверхностному слою

температурой, соленостью ($>18,00$) и

плотностью ($\sigma_t >13,50$). Эти воды

распространились до вершинной части

бухты и образовали резкий пикноклин в

слое 6-8 м. Наличие в центральной

части бухты обширной области вод с

пониженной соленостью повлияло на

среднее значение солености, которое в

ноябре 1998 г. оказалось ниже, чем

вершинной части. Ноябрьская съёмка

проводилась при ветрах юго-западного

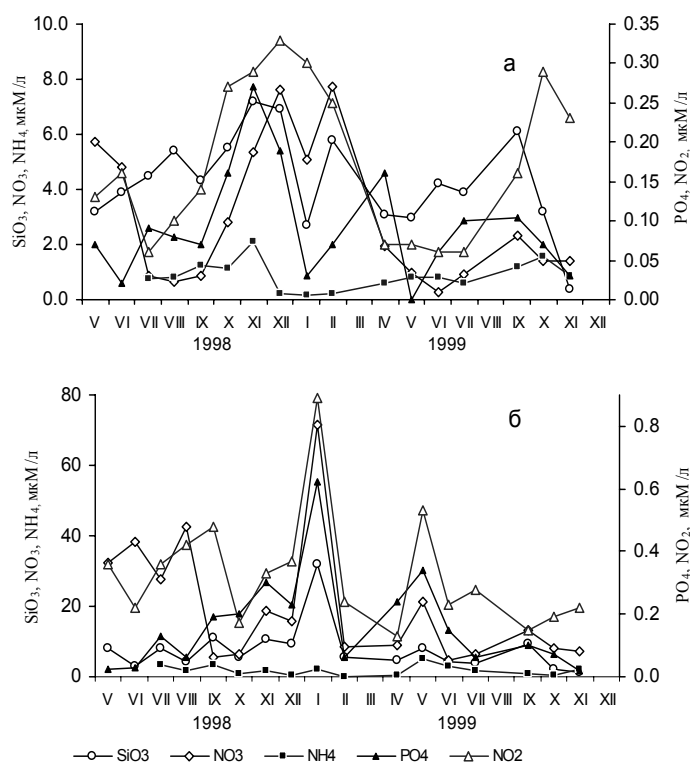


Рис. 10. Изменение величин содержания биогенных элементов в Севастопольской (а) и Южной бухтах (б) в 1998-1999 гг. (осреднены значения поверхностного и придонного слоев) [8]

и южного направлений скоростью 10-17 м/с. Под влиянием этих сгонных для Южной бухты ветров здесь наблюдалось повышение солености до 17,8 и уменьшение содержания биогенных веществ (рис. 10б). В Севастопольской бухте в ноябре-декабре их содержание достигло максимальных значений (рис. 10а). Подобные ситуации, когда в центральной части бухты (район ст. 4) образуется локализованная область распресненных вод, не являются редкостью. Они наблюдались в октябре и декабре 2000 г., в июле и декабре 2001 г., мае и ноябре 2003 г., июле 2004 г. и в январе 2005 г. При этом отмечено, что такие линзы с распресненной водой содержат повышенные концентрации биогенных и загрязняющих веществ [11]. Вероятно, поэтому эта часть бухты выделена как район "сильного" загрязнения, уступающий только Южной бухте как району "очень сильного" загрязнения. Водообмен между Севастопольской и Южной бухтами ухудшается в периоды адвекции морских вод в бухту, когда их основной поток распространяется вдоль южного берега Севастопольской бухты (как, например, в январе 1999 г.) и запирает воды Южной бухты в вершинной части, способствуя увеличению там концентраций загрязняющих веществ и ухудшению экологической обстановки (рис.10 б). Ситуация в

Южной бухте улучшилась только в феврале 1999 г., когда относительно чистые морские воды, сформировавшиеся в Севастопольской бухте в январе, достигли вершинной части Южной бухты. Кроме этого, перед февральской съёмкой наблюдались юго-западные и южные ветры силой 9-13 м/с, которые вызвали на этот раз сгон загрязненных поверхностных вод из Южной бухты в Севастопольскую бухту. В феврале 1999 г. средняя соленость в Южной бухте (ст.6) возросла до максимального за период мониторинга значения – 18,03, и оказалась самой высокой во всей Севастопольской бухте (рис. 8). В этот наиболее холодный период, когда обычно наблюдается максимальное охлаждение вод при интенсивной конвекции, в бухте образовался слой скачка температуры, солености и плотности, разделявший появившиеся вновь распресненные (загрязненные) поверхностные воды бухты и морские воды, распространявшиеся в слое глубже 5 м (рис. 11). Поступление морских вод в Севастопольскую бухту продолжалось в течение всего периода подъема уровня, вплоть до июня 1999 г. Это привело к тому, что в мае воды Южной бухты были вновь заблокированы. В июле величина средней солености в вершинной части (ст.2) оказалась выше среднего значения по бухте и выше, чем в зоне входа в бухту. В мае-июне, в периоды проведения съёмок преобладали ветры северных, северо-восточных направлений силой 8-12 м/с, которые способствовали сгону загрязненных поверхностных вод из Севастопольской бухты и, следовательно,

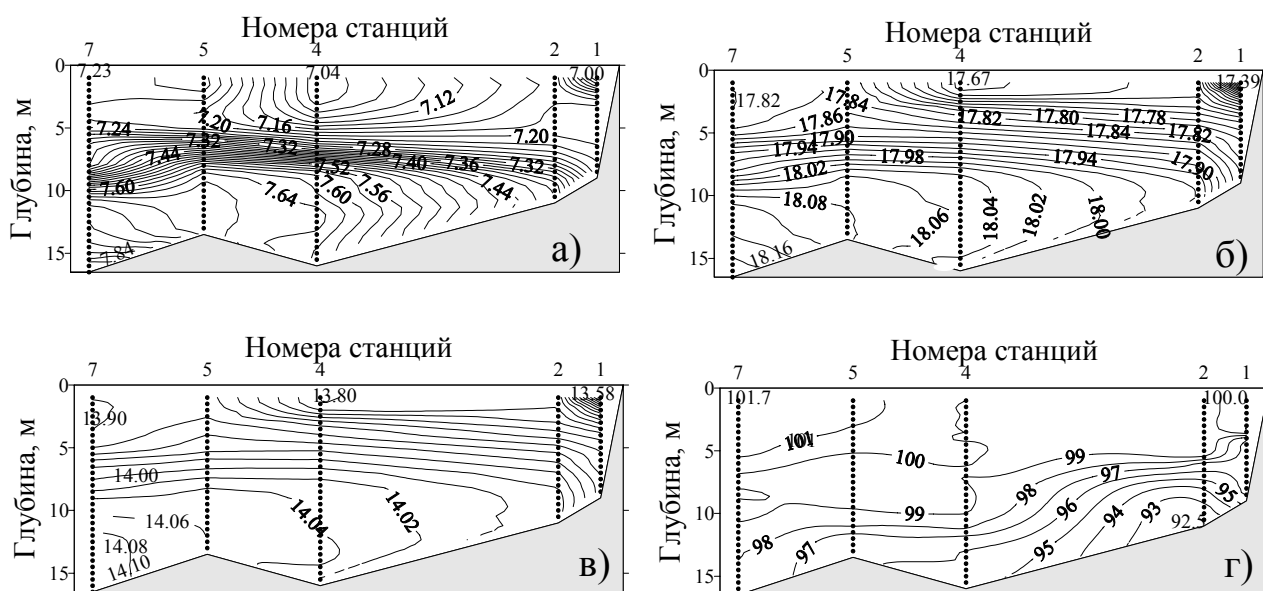


Рис. 11. Распределение температуры воды (а), солености (б), условной плотности (в) и растворенного кислорода (г) на разрезе вдоль Севастопольской бухты в феврале 1999 г.

уменьшению концентрации химических показателей. В Южной бухте вновь было отмечено скопление загрязненных вод, распресненных в среднем до 16,2-17,5 (рис.8), с повышенным уровнем биогенных веществ (рис.10).

В летние месяцы 1999 года из-за аномально жаркой погоды обострились негативные для экосистемы явления. В июне и июле процессы водообмена бухты с морем замедлились. Уровень воды стабилизировался (рис.8). Под влиянием высокой температуры воздуха и ослабления ветровой деятельности (среднемесячные значения скорости ветра летом 2-3 м/с, рис.2в) образовалась устойчивая вертикальная стратификация вод с горизонтальным расположением слоев. При этом слой термогалокина (скачка температуры и солености) опустился до придонных горизонтов (рис. 12 в, г). В поверхностном слое в вершинных частях бухты температура воды в июне превысила 27 °С (рис. 12а), а через входной пролив поступали прогретые морские воды (26,4-26,8 °С) с соленостью ниже, чем в бухте (рис. 12 б, г), что указывает на присутствие вод северо-западной части Черного моря или Азовского моря. В период июльской съемки в Южной бухте отмечен максимум температуры воды на поверхности (28,14 °С), а слой с температурой выше 25 °С увеличился в Южной и Севастопольской бухтах с 5 до 13 м. Ослабление горизонтального адвективного и вертикального турбулентного обмена способствовало развитию гипоксии – снижению насыщения вод кислородом в придонном слое на всей акватории Севастопольской (до 60 %) и Южной (до 28 %) бухт. Негативная ситуация продолжалась до тех пор, пока в толще вод бухты сохранялась относительно высокая температура (20-21 °С) и устойчивая вертикальная стратификация. В августе 1999 г. началось интенсивное понижение уровня моря - до 10 см в месяц (рис. 8) за счет того, что сток вод из бухты преобладал над процессами адвекции. С этим связано понижение солености вод бухты в сентябре-октябре до 17,6-17,8.

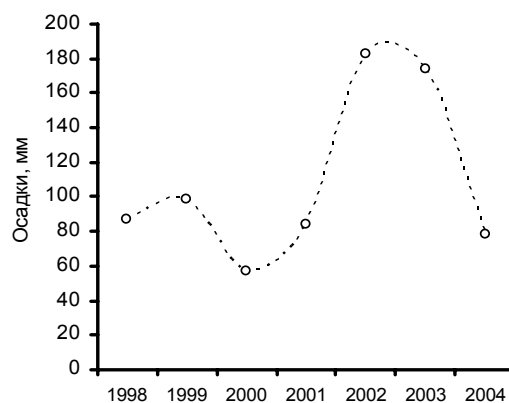


Рис. 13. Годовые величины атмосферных осадков. МГ Севастополь

Температурный фон 2000 и 2001 гг., в противоположность 1999 г., оказался пониженным (рис. 2а). Этому способствовали сильные ветры, которые наблюдались не только в холодные периоды, но и в летние месяцы (рис. 2 б, в). Эти годы выделяются также минимальным количеством атмосферных осадков, выпавших в районе Севастополя (рис. 13). Поэтому не было сбросов Чернореченского водохранилища и не было отмечено случаев значительного уменьшения солености воды в бухте. Сезонные изменения уровня воды соответствовали многолетней норме с максимумом в весенне-летний период и минимумом зимой (рис. 14).

В периоды относительной стабильности уровня в декабре 2000 г., июне-июле и декабре 2001 г., а также в декабре 2002 - январе 2003 г. под воздействием сильных (до 10-14 м/с)

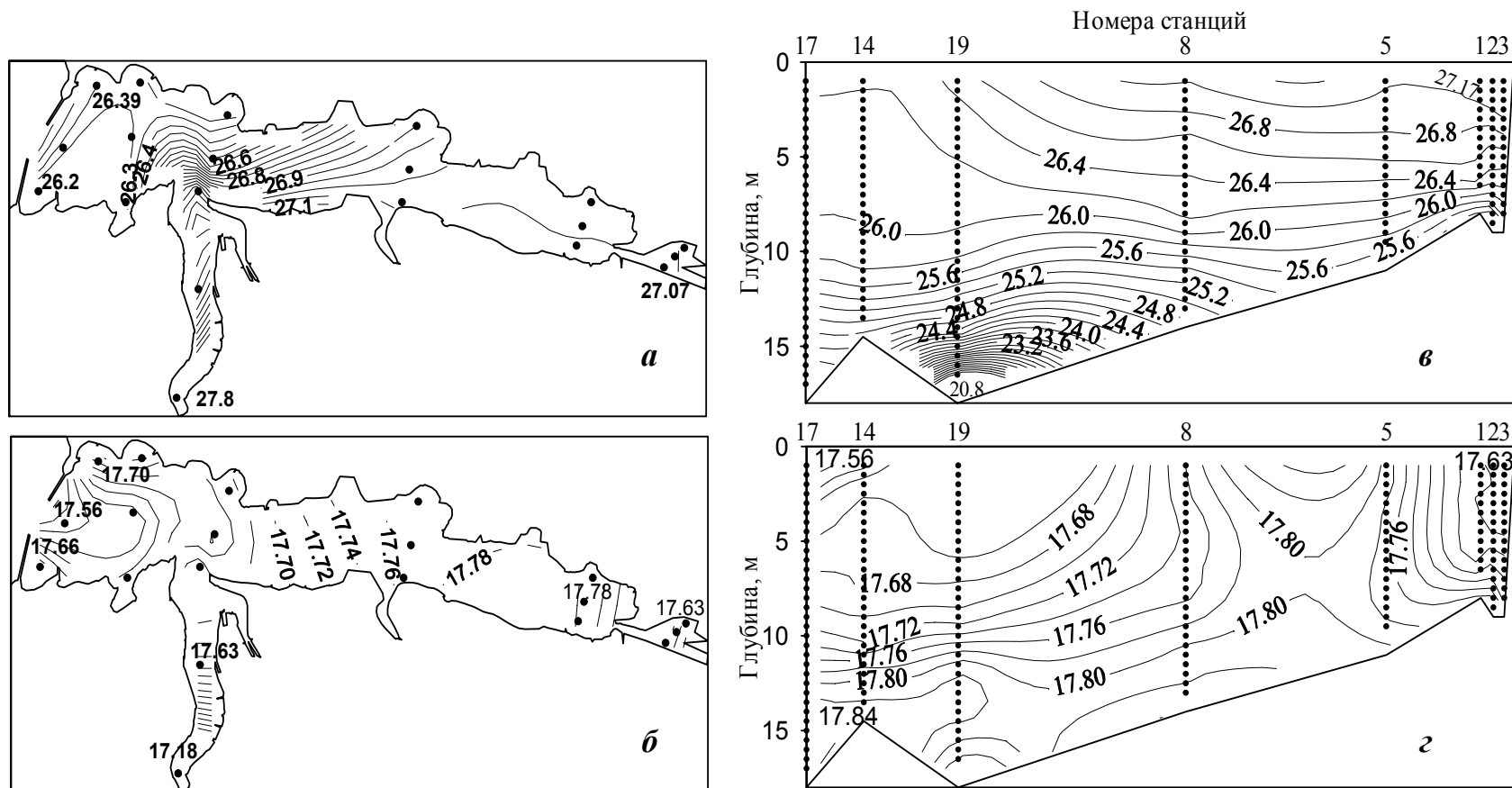


Рис. 12. Температура (*a*, *в*) и соленость (*б*, *г*) на поверхности Севастопольской бухты (*a*, *б*) и на продольном разрезе через бухту (*в*, *г*) в июне 1999 г.

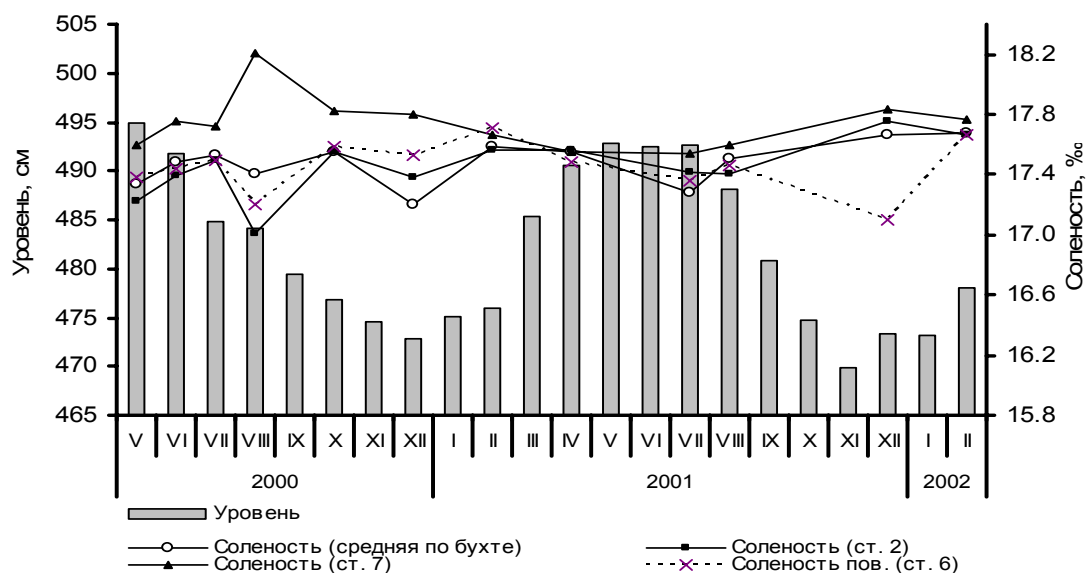


Рис. 14. Изменение средних месячных величин уровня воды и солености воды в Севастопольской и Южной бухтах в 2000-2002 гг.

ветров южных и северо-восточных направлений в центральной части Севастопольской бухты формировались упомянутые выше антициклонические структуры с линзами распресненных вод. Под влиянием этих вод средние по бухте значения солености вновь оказались ниже величин солености в вершинных частях (ст.2 и 6), расположенных в непосредственной близости от устья р.Черной и мест основных ливневых стоков Южной бухты.

В качестве наиболее характерного примера подобного распределения солености приведем данные разреза, выполненного вдоль Севастопольской бухты 18 ноября 2003 г. (рис. 15).

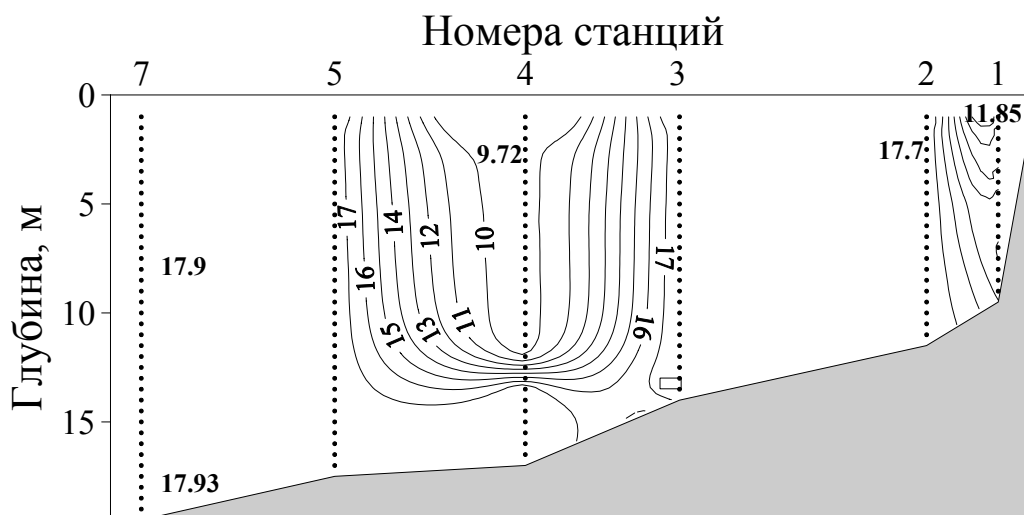


Рис. 15 Распределение солености воды на продольном разрезе через Севастопольскую бухту в ноябре 2003 г.

Как было показано в [11], сам факт наличия в бухте вод с соленостью менее 17,0 (в данном случае минимум 9,72) может быть связан только со сбросом большого объема пресной воды из Чернореченского водохранилища. Это подтверждается и очень низкой соленостью (11,85) в вершинной части бухты (ст.1). Атмосферные осадки в районе бухты накануне и в день выполнения разреза не превышали 8-9 мм, а месячная сумма осадков в ноябре (25 мм) была ниже среднемноголетней нормы. В течение дня 18.11.2003 г. южный ветер силой 8-9 м/с сменился штормовым северным, затем северо-восточным ветром скоростью 10-12 м/с. Можно предположить, что столь резкая смена направления сильного ветра и импульс завихренности вызвали образование вихревой антициклонической динамической структуры в центральной части бухты и отторжение линзы распресненных вод от потока из устья р. Черной. Формированию такой структуры, возможно, способствовал интенсивный подъем уровня моря, происходивший в течение ноября 2003 г. (рис.7) и препятствовавший стоку распресненных вод из бухты.

Интенсивное поступление пресных вод в 2003 г. было отмечено уже в январе, когда соленость поверхностного слоя бухты (включая предпроливную часть) была ниже 17,0, а в вершинных частях бухты она понизилась до 16,69 (ст.6) и 14,57 (ст.2). Это было вызвано также сбросами Чернореченского водохранилища, переполненного в результате обильных дождей осенью 2002 г., когда в течение сентября и октября выпало по 138 мм осадков, что более чем в 4 раза превышает месячную норму (рис.16). Вероятно, поэтому даже сравнительно небольшие январские осадки (48 мм) потребовали сброса излишков воды из водохранилища, что и привело к упомянутому выше распреснению вод бухты.

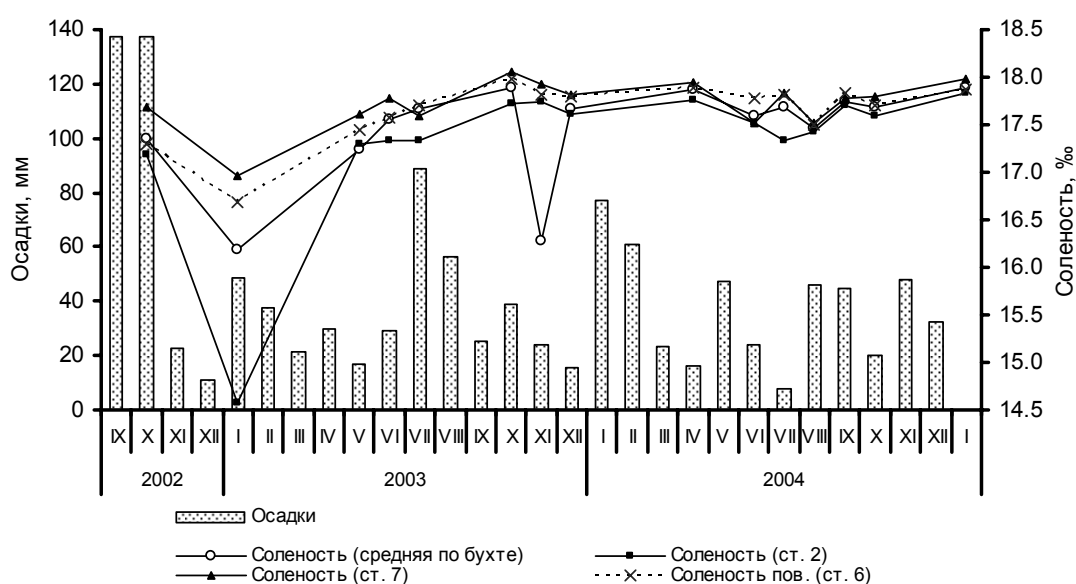


Рис. 16. Изменение месячных сумм (мм) атмосферных осадков и средних значений солености воды в Севастопольской и Южной бухтах в 2002-2004 гг.

Как указывалось ранее, особенностью 2003 г. является аномальное понижение уровня воды с января по ноябрь, в том числе в весенне-летний период (рис.7), когда из-за сильной засухи в бассейнах европейских рек паводок на Дунае и других реках был минимальным. В течение этого времени преобладал сток воды из бухты, что замедляло процессы водообмена бухты с морем, поэтому соленость изменялась незначительно: от 17,3 в вершинной части (ст.2) до 17,7 у выхода из бухты (ст.7). Только в октябре, когда понижение уровня прекратилось, под воздействием нагона сильными южными и юго-восточными ветрами (до 14 м/с) в бухту вошли морские воды соленостью 17,73-18,05.

Начиная с ноября 2003 г. и до июня 2004 г., продолжалось последовательное повышение уровня воды (рис.7). При этом в бухту поступали морские воды с повышенными значениями солености (17,7-18,1). Длительность периода адвекции морских вод, малое количество осадков и нагонные (южные, юго-западные и западные) ветры привели к тому, что на протяжении 4-х месяцев (июнь-сентябрь 2003 г.) в Южной бухте аккумулировались относительно чистые морские воды с максимальной для всей бухты соленостью (рис.16). В июле значения солености изменялись здесь от 17,64 на поверхности до 18,11-18,37 в придонном слое, что является исключительно редким явлением для Севастопольской бухты. Подобная ситуация сохранялась во втором полугодии 2004 г. и январе 2005 г., несмотря на различие тенденций изменения уровня.

Особенности пространственного распределения температуры и солености по акватории Севастопольской и Южной бухт в различные сезоны года рассмотрены на примере съёмок 2004-2005 гг. (рисунки 17 и 18).

В апреле 2004 г. в результате интенсивного *весеннего* прогрева поверхностного слоя бухты и поступления в бухту более теплых и пресных вод р.Черная начал формироваться сезонный термогалоклин, разделивший относительно теплые (10,5-11,7 °С), распресненные (17,34-17,70) поверхностные воды и придонные более холодные (8,7-9,0 °С), с повышенной соленостью (18,0-18,1) морские воды. Максимальная температура и минимальная соленость отмечены в вершинной части бухты (ст.1), что объясняется мелководьем и стоком речных вод. Поступающие с запада через входной пролив морские воды выделяются пониженной температурой и повышенной соленостью (рис. 17а, 18а). В придонном слое эти воды распространились до самой вершины бухты, а зона распресненных вод была ограничена акваторией Инкерманского ковша (рис. 17в, 18в).

Перечисленные особенности термогалинной структуры вод бухты сформировались в результате следующих гидрометеорологических условий. Накануне съёмки, в течение 9 суток с 05 по 13 апреля, через Черное море медленно смещалась восточная периферия циклона с устойчивыми ветрами южного и юго-восточного направлений силой 7-12 м/с.

После прохождения через Крымский полуостров центра циклона (15 апреля) ветер сменился на северо-восточный (12-10 м/с), и в день выполнения съемки (16 апреля) скорость такого ветра изменялась от 3-4 до 5-6 м/с. Вызванное этим ветром дрейфовое поверхностное течение с более теплыми и распресненными водами распространялось с востока на запад. В слое глубже 10 м воды с пониженной температурой ($\leq 9,8^{\circ}\text{C}$) и повышенной соленостью (≥ 18), поступившие в бухту под влиянием упомянутых нагонных южных и юго-восточных ветров, удерживались в бухте компенсационным придонным течением, направленным на восток. Язык этих вод хорошо виден на рис. 17в и 18в. Прижимаясь к южному берегу, он распространялся в Южную бухту, а также в вершинную часть Севастопольской бухты, образуя резкий пикноклин в слое 8-10 м. В предпроливной части бухты была расположена область с повышенными горизонтальными градиентами, которая характеризовалась подъёмом к поверхности вод с повышенной соленостью и плотностью.

При переходе от весны к *лету* продолжался прогрев водных масс бухты до $23-24^{\circ}\text{C}$ при незначительных изменениях солености (рис.17 б, 18 б). Летняя съёмка бухты выполнялась 16 июля при слабых ветрах переменных направлений, однако в предыдущие сутки наблюдался устойчивый юго-западный ветер (5-7 м/с). Под его воздействием западное поверхностное течение с водами пониженной солености (17,6-17,75) было смещено к северному побережью, что особенно проявилось в поле солености. В придонном слое хорошо видна адвекция в бухту морских глубинных, необычно соленых (18,00-18,37) и холодных ($11,5-15,0^{\circ}\text{C}$) вод (рис.17г, 18г), образующих в центральной части бухты фронтальную зону с линзой распресненных вод с соленостью до 17,5. Морские воды в придонном слое (≥ 10 м) распространялись вплоть до бухты Голландия. Они проникали и в Южную бухту, достигая ее вершинной части. В условиях слабой ветровой деятельности и максимального прогрева поверхностных вод, при ослаблении горизонтального и вертикального обмена, на глубине 12-14 м сформировался резкий термогалоклин (пикноклин), что могло способствовать развитию процесса гипоксии в придонном слое отдельных участков бухты.

Осенняя съёмка была выполнена 26-27 октября в условиях выхолаживания вод, при слабых ветрах переменных направлений и стабилизации самого низкого в этом году положения уровня моря (рис.7). В этот период перестройки гидрологической структуры наиболее холодные ($14,93-15,7^{\circ}\text{C}$) и распресненные до 16,81-17,50 воды располагались в вершинной части Севастопольской бухты, в зоне устья р.Черная. Воды основной части бухты были хорошо перемешаны, температура и соленость изменялись незначительно, термогалоклин располагался глубже 15 м. Область с повышенной температурой (16,0-

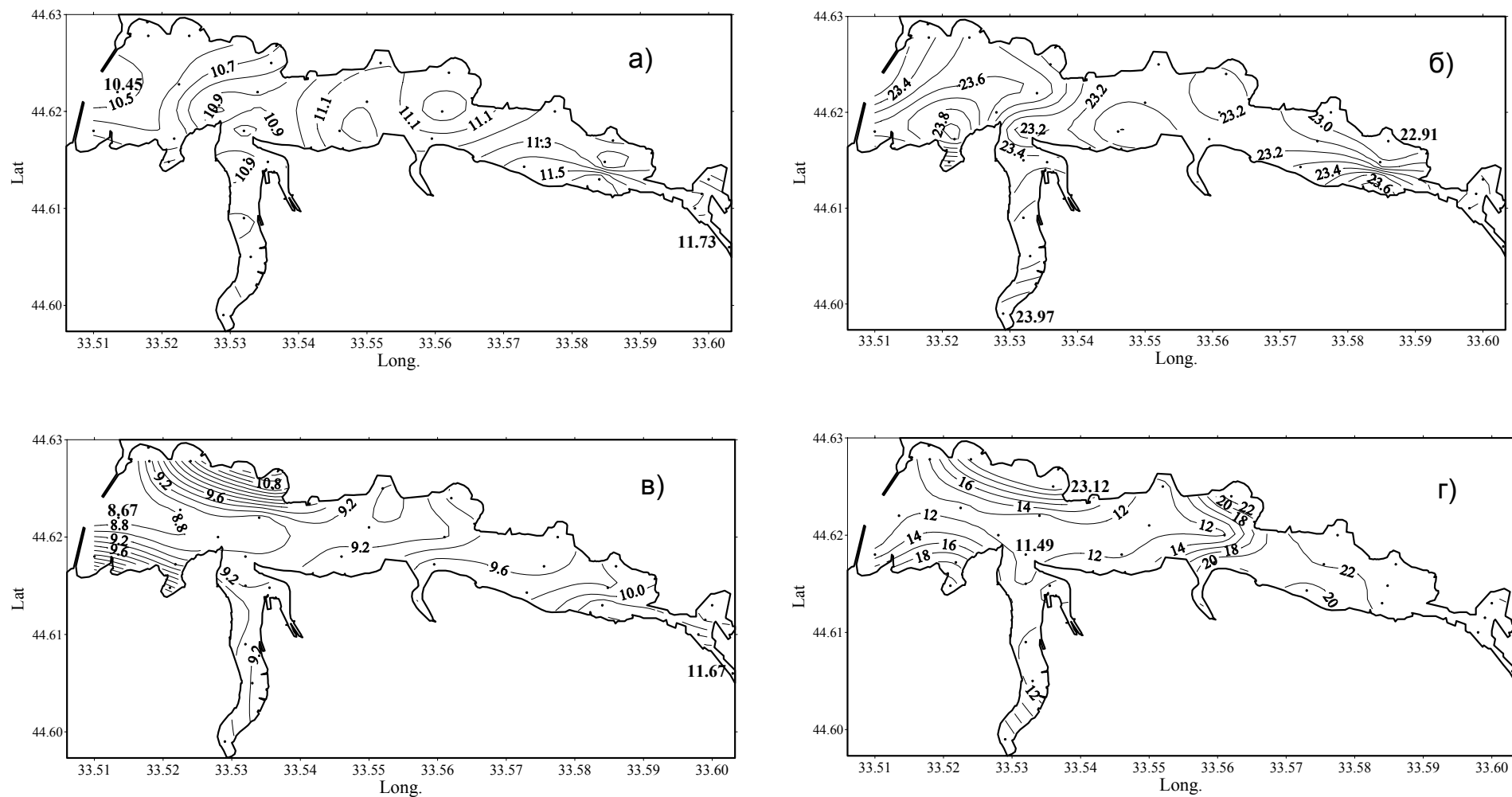


Рис. 17. – Распределение температуры в Севастопольской бухте: весной 2004 г. в поверхностном (а) и придонном (в) слоях, летом 2004 г в поверхностном (б) и придонном (г) слоях.

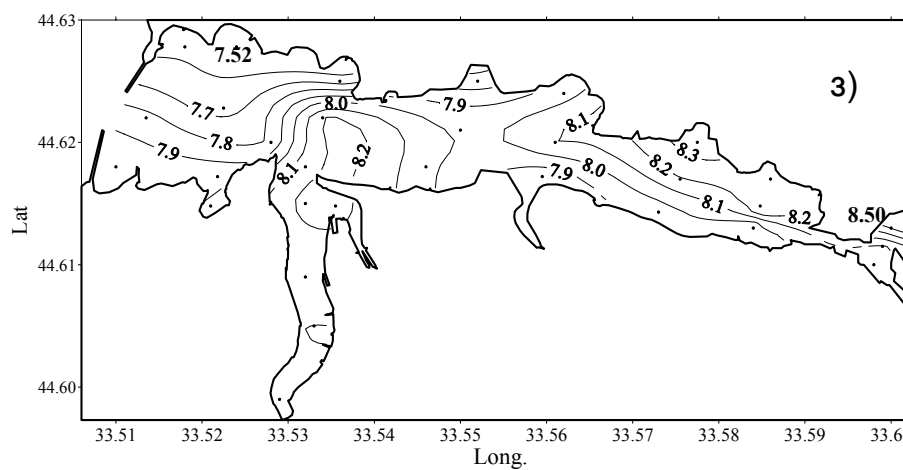
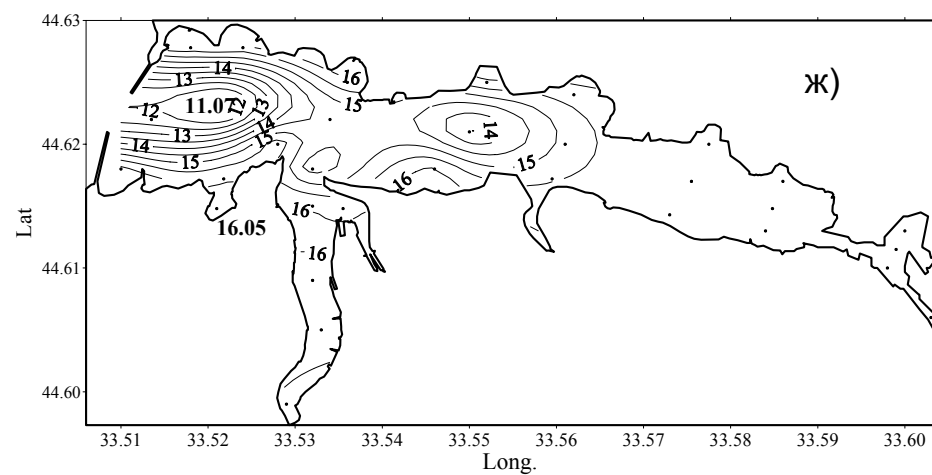
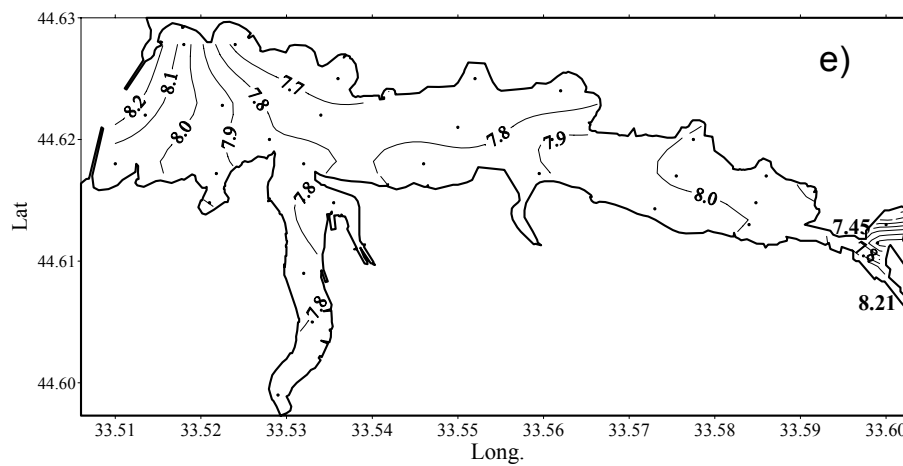
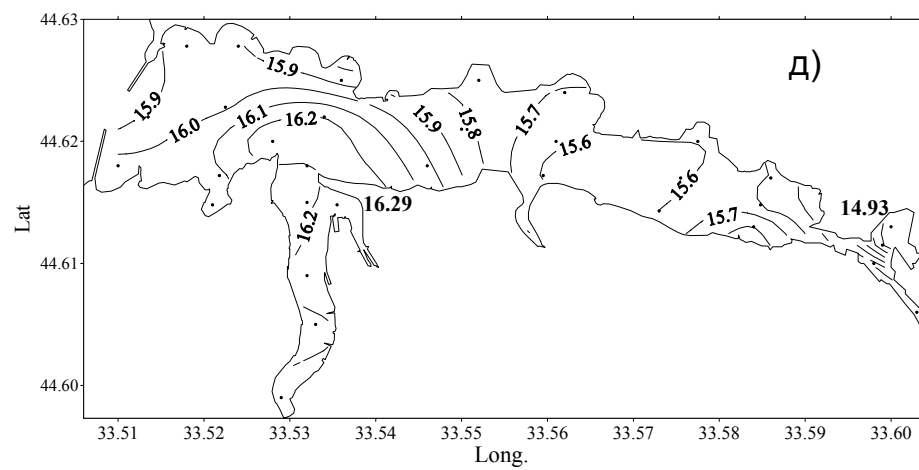


Рис.17. (продолжение). Распределение температуры в Севастопольской бухте: осенью 2004 г. в поверхностном (д) и придонном (ж) слоях, зимой 2005 г в поверхностном (е) и придонном (з) слоях.

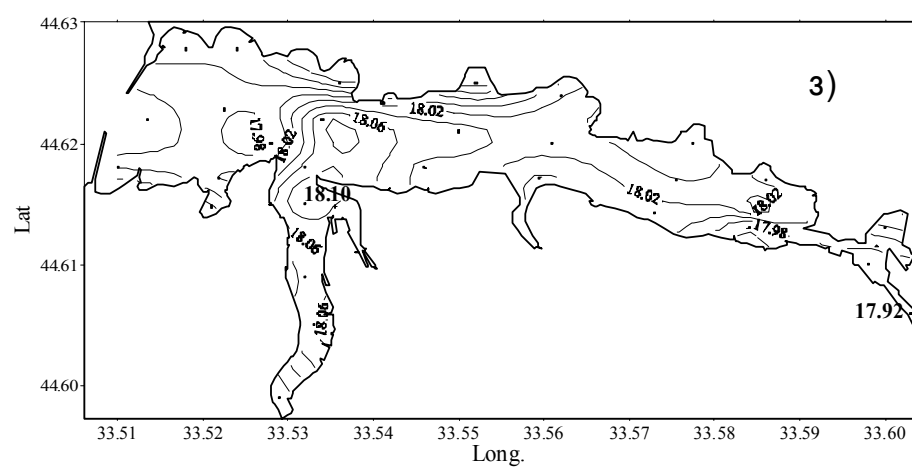
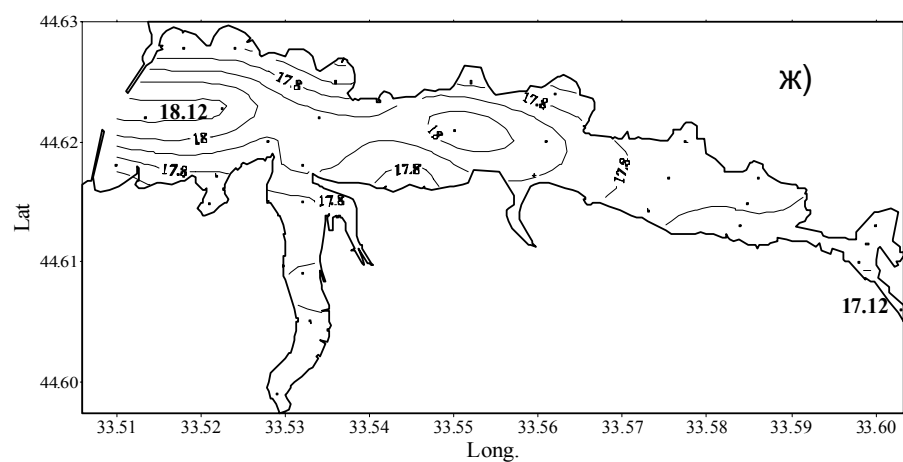
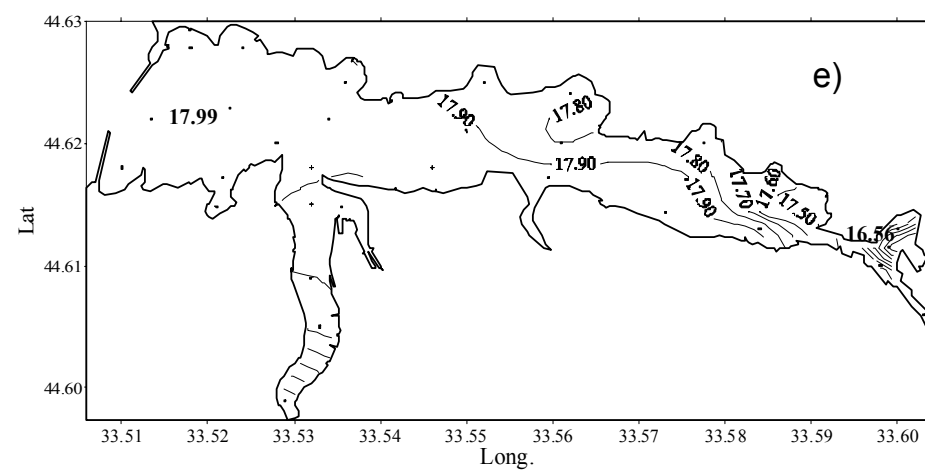
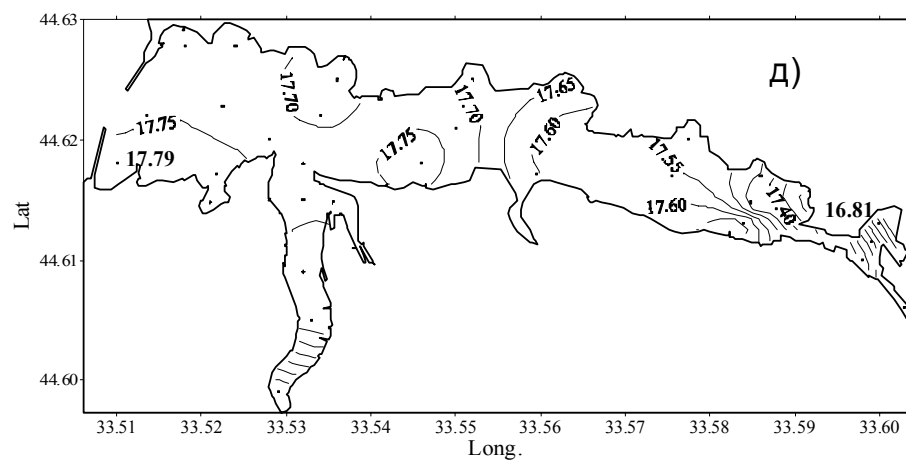


Рис.18. (продолжение). Распределение солёности в Севастопольской бухте: осенью 2004 г. в поверхностном (д) и придонном (ж) слоях; и зимой 2005 г в поверхностном (е) и придонном (з) слоях.

16,3°C) выделялась в Южной бухте и прилегающем к ней районе (рис.17д). Соленость постепенно повышалась до 17,79 к выходу из бухты, (рис. 18д). В тонком придонном слое (глубже 15 м) еще сохранялись наиболее соленые ($\geq 18,0$) и холодные (9,13-15,0 °C) воды, локализованные в предпроливной и центральной частях бухты (рис. 17ж, 18ж). Вертикальное положение изолиний температуры, солености и кислорода в предпроливном районе свидетельствует о наличии фронтальной зоны между водами бухты и моря, а также слабом водообмене.

В зимний период гидролого-гидрохимическая съемка была выполнена 25-26 января 2005 г. при довольно типичных гидрометеорологических условиях. Синоптическая ситуация (рис.19) была аналогична апрельской (2004 г.) съемке, когда над Черным морем

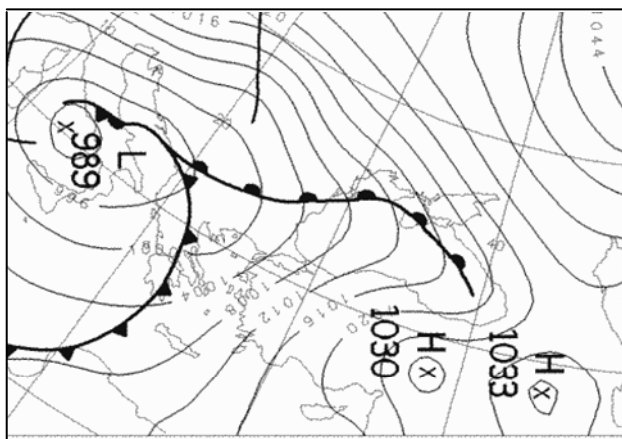


Рис. 19. Синоптическая ситуация над Черноморским регионом 25-26 января

располагалась восточная периферия циклона (центр над Италией) с устойчивыми ветрами южного направления силой 8-10 м/с. Под воздействием этих нагонных для Севастопольской бухты ветров через пролив поступали сравнительно теплые (7,9-8,2 °C, рис.17е и 17з), насыщенные кислородом ($\geq 98\%$) морские воды.

Значения солености этого потока морских

вод (рис.18е и 18з), охватывавшего весь слой от поверхности до дна, были существенно ниже, чем "старые" воды бухты с пониженным содержанием растворенного кислорода (85-95%). В придонном слое центральных частей Севастопольской и Южной бухт (рис. 17з и 18з) выделяются локализованные фронтальной зоной области этих более соленых (18,0-18,1) и теплых (8,0-8,2 °C) вод с повышенным содержанием биогенных веществ. Как было показано выше, обычно повышенными концентрациями биогенных и загрязняющих веществ характеризовались распресненные (речными и сточными водами) линзы. В данном случае, когда адвекция морских вод в бухту поддерживалась нагонными ветрами и общим подъемом уровня моря, сложилась достаточно необычная ситуация, при которой сформировавшиеся ранее воды бухты с повышенной соленостью оказались более загрязненными, чем относительно распресненные морские воды.

Выводы.

1. Проведение комплексных исследований в 1998-2005 гг. позволило выявить особенности влияния гидрометеорологических условий на изменения гидрохимической структуры вод Севастопольской бухты. Причины этих изменений были обусловлены

влиянием природных и антропогенных вариаций океанографических условий, существенно различавшихся в указанные годы.

2. Особенностью 1998 года является экстремальное поступление в Севастопольскую бухту распресненных речным стоком вод, что значительно ограничило приток морской воды. В 1999 году на улучшение состава и качества вод бухты преобладающее влияние оказывали процессы адвекции морских вод. Однако в периоды наибольшего летнего прогрева из-за ослабления динамических процессов в бухте отмечено развитие гипоксии в придонных слоях. Период 2001–2002 гг. выделяются минимальным количеством атмосферных осадков и отсутствием сбросов Чернореченского водохранилища, поэтому не отмечено случаев значительного уменьшения солености воды в бухте. В 2003 г. отмечено аномальное понижение уровня воды, в том числе в весенне-летний период. В этом году преобладал сток воды из бухты, что замедляло процессы водообмена бухты с морем. В 2004 г. преобладало повышение уровня моря, поэтому в результате адвекции в бухту поступали чистые морские воды с повышенными значениями солености.

3. На изменения экологических условий, распределение загрязненных вод в различных частях Севастопольской и Южной бухт значительное влияние оказывают интенсивность водообмена, динамика вод в бухтах и сгонно-нагонные ветры. Наиболее неблагоприятная ситуация в Южной бухте складывается, когда в периоды адвекции морских вод действуют ветры северных, северо-восточных и восточных направлений, которые, в свою очередь, способствуют очищению собственно Севастопольской бухты. Под влиянием сильных и продолжительных ветров южных направлений создается противоположная ситуация. А поскольку в среднем за год преобладают ветры северных и восточных направлений, экологические условия в Южной бухте остаются неблагоприятными в течение большей части года.

4. Наряду с техногенным загрязнением, важным антропогенным фактором являются искусственные экстремальные сбросы воды Чернореченского водохранилища и связанное с ними интенсивное распреснение вод бухты и сопредельного района моря. Минимальные объёмы стока зарегулированной водохранилищем реки Черной, наоборот, способствуют усилению адвекции морских вод в бухту. Эти явления оказывали важное влияние на формирование гидролого-гидрохимической структуры.

5. Кроме речного стока и сгонно-нагонных ветров важным фактором водообмена Севастопольской бухты являются колебания уровня Черного моря, связанные с общециркуляционными процессами и изменениями водного баланса моря. Первые два фактора могут лишь усиливать или ослаблять процессы поступления (адвекции) морских

вод в бухту или стока вод из бухты, которые в первую очередь определяются сезонными изменениями уровня моря.

6. Морфометрические особенности, полузамкнутость бухты, искусственное сужение входного пролива способствуют при определенных ветровых условиях формированию вихревых динамических структур внутри бухты. Замкнутые циркуляционные ячейки локализуют линзы распресненных вод, в которых накапливаются загрязняющие вещества.

7. Результаты мониторинга Севастопольской бухты показали, что при изучении состояния прибрежных акваторий в дополнение к гидрохимическим исследованиям должны быть привлечены гидрологические (речные) и океанографические наблюдения, а также информация об особенностях водообмена внутри бухты и бухты с морем, о сезонных и короткопериодных изменениях гидрометеорологических условий.

Гидрохимическая структура вод

Формирование гидрохимических условий в Севастопольской бухте определяется процессами, которые происходят в толще вод бухты на всем её протяжении, на её водосборной площади и при водообмене с сопредельной акваторией моря. Как выше было показано, влияние антропогенных факторов также весьма значительно. Таким образом, гидрохимический режим бухты формируется под влиянием природных и антропогенных факторов.

Особенности гидрохимической структуры вод бухты рассмотрены в основном на примере распределения растворенного кислорода и биогенных веществ как наиболее показательных характеристиках экологического состояния акватории.

Растворенный кислород. Выполненные исследования показали, что в результате продолжительного антропогенного влияния на экосистему Севастопольской бухты её гидрохимический режим и, в частности, режим кислорода, претерпел значительные изменения [6,7,11]. В части растворенного кислорода эти изменения проявлялись

- в изменении уровня концентрации и в особенностях вертикального распределения;
- в нарушении характера сезонного распределения;
- в перестройке внутриводоёмных процессов, протекающих с участием растворенного кислорода.

Сезонное распределение кислорода в бухте определяется двумя главными природными факторами: климатическими (температурный режим и гидродинамика вод) и биологическими. Пространственное распределение кислорода по площади для весны (апрель) и лета (июль) представлено на рис.20 и 21. Как видно из рисунков, в апреле после

зимнего конвективного перемешивания вод и весеннего массового «цветения» фитопланктона на поверхности и в придонных слоях наблюдаются максимальные концентрации кислорода ($\geq 7,0$ - $7,6$ мл/л) и с насыщением больше 100%. Исключением является наиболее загрязненная кутовая часть Южной бухты, где насыщение воды кислородом составляет немногим более 90 %.

Иная картина наблюдается летом. Если в поверхностных слоях насыщение вод кислородом на всей акватории, кроме Артиллерийской бухты, составляет $\geq 100\%$, то в придонном слое оно понижается до 85-95% (рис. 21 г). В отличие от вод открытого моря, где запасы биогенных веществ в слое фотосинтеза исчерпаны, и, следовательно, продукция фитопланктона и концентрация кислорода снижены, в евтрофированных водоемах, таких как Севастопольская бухта, массовое «цветение» фитопланктона наблюдается и в летний период [40] за счет сброса бытовых стоков и обогащения вод биогенными элементами. При этом поверхностные слои значительно насыщаются кислородом (до $\geq 200\%$ нас.), а продуцируемое избыточное взвешенное органическое вещество (ОВ) поступает в придонные слои вод и в донные осадки. Период летней стагнации, как было показано при рассмотрении термогалинной структуры, характеризуется высокой температурой (до $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более) и повышенной плотностной стратификацией. Подобная ситуация повторилась и в июле 2004 г. Поверхностные воды были пересыщены кислородом на всей акватории бухты (100-111 % нас.) за исключением Артиллерийской бухты, где насыщение кислородом составляло менее 95 % (рис. 21 б). При высоких температурах воды интенсивность окислительных процессов усиливается. Так, по данным работы [41] почти полное (на 90%) окисление нестойкого органического вещества планктона протекает за 112 дней при температуре $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, за 51 день – при $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и за 23 дня – при $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Относительно высокая плотностная стратификация затрудняет поступление кислорода в нижележащие слои водной толщи. В таких ситуациях и отмечаются явления гипоксии. Более всего это характерно для самой загрязненной части исследуемой акватории – Южной бухты, что было ранее показано в работах [7-12].

Развитию процесса гипоксии способствует накопление в донных осадках органического вещества, поступающего в зимний период со сточными водами и речным стоком. Из-за мелководности бухты, высокой скорости осадконакопления и низких температур зимой значительная часть легкоокисляемого органического вещества не успевает окислиться в водной толще и поступает в донные осадки. Летом кислород в придонных слоях затрачивается не только на окисление свежееобразованного органического вещества, но и ранее захороненного, что вносит свои коррективы в течение внутриводоемных процессов.

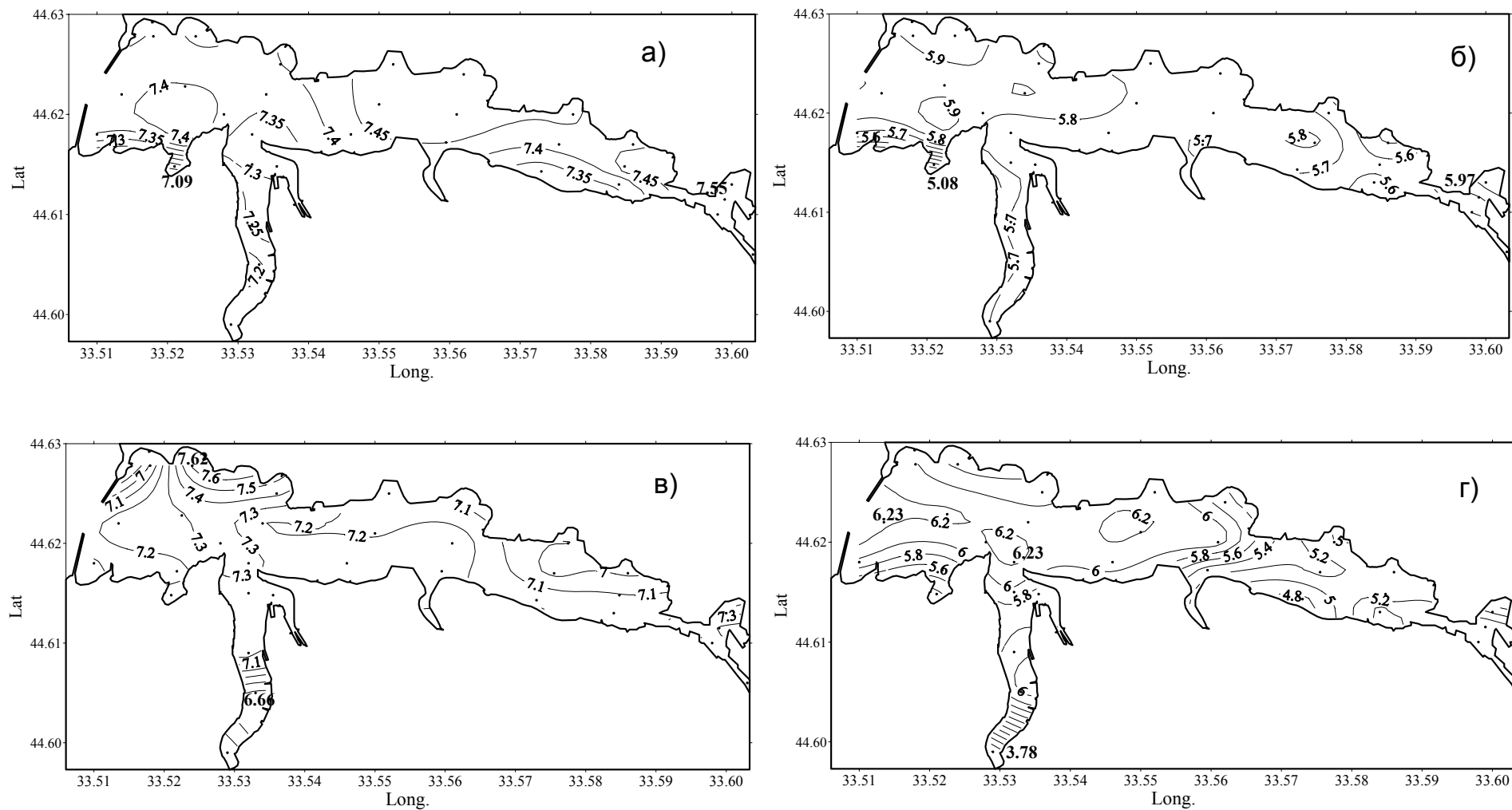


Рисунок 20. – Распределение кислорода в Севастопольской бухте: весной 2004 г. в поверхностном (а) и придонном (в) слоях; летом 2004 г в поверхностном (б) и придонном (г) слоях.

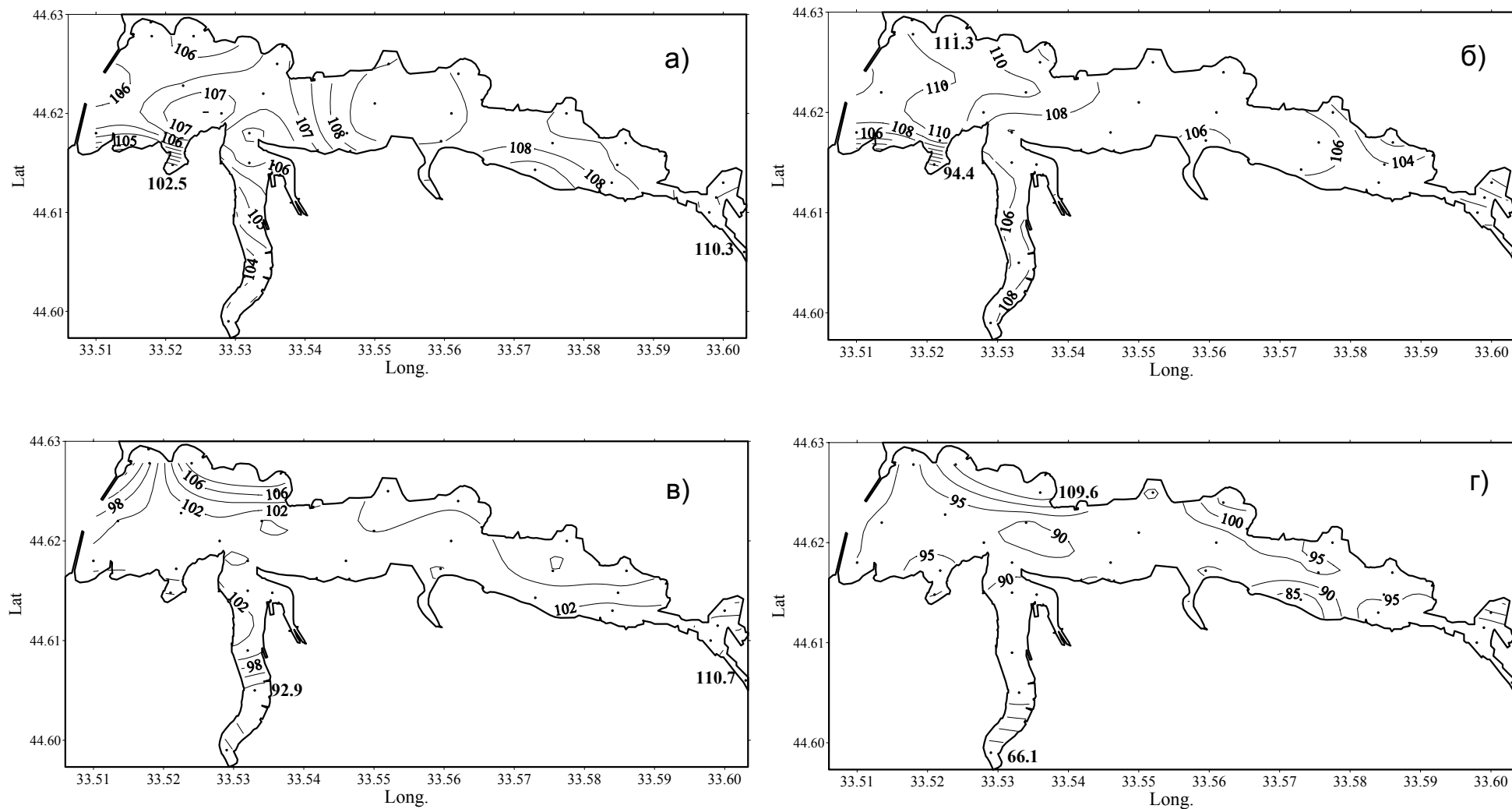


Рисунок 21. – Насыщение вод Севастопольской бухты кислородом: весной 2004 г. в поверхностном (а) и придонном (в) слоях; летом 2004 г в поверхностном (б) и придонном (г) слоях.

Результаты исследования режима кислорода, выполненные в 2004-2005 гг., в общих чертах подтверждают установленные ранее закономерности, хотя особенности межгодовой изменчивости проявляются. На рис. 22 представлена межгодовая изменчивость кислорода в Южной бухте. Из рисунка видно, что описанные выше явления наблюдаются ежегодно, хотя их масштаб и выраженность различаются. В период наблюдения в июле 2004 г. концентрация кислорода в придонных слоях Южной бухты составляла <4 мл/л (рис. 20 г), что ниже оптимальной нормы, установленной для рыбохозяйственных водоёмов ($\text{ПДК}_{\text{рх}} = 6,0$ мг/л или 4,2 мл/л) [46]. Анализируя данные межгодовой изменчивости содержания кислорода можно отметить, что, несмотря на достаточно низкие концентрации кислорода в придонном слое, развитие фотосинтетических процессов в июле 2004 г. не было таким активным, как в июле 1999 г. или в июле 2001 г., то есть процесс гипоксии не был столь явно выражен. Очевидно, что, наряду с гидрометеорологическими и динамическими факторами, масштабы явления от зависят от величины продукции кислорода в период, предшествующих гипоксии, и от поставки органического вещества. Так, максимальному уровню гипоксии в 1999 г. предшествовал высокий речной сток в 1998 г. с выносом значительной массы органических веществ и низкой продукцией кислорода весной 1999 г. В 2000 г. при высокой весенней концентрации дефицит кислорода был выражен значительно слабее (рис. 22).

Следует также отметить, что для бухты характерно явное нарушение естественного режима кислорода. В позднеосенний период и в начале зимнего периода (в ноябре-январе - феврале) в поверхностном слое наблюдается дефицит кислорода. Насыщение кислородом не поднимается выше 80-90%, тогда как для открытых прибрежных и глубоководных районов моря характерно нормальное (100%) насыщение вод кислородом. В холодное время года как в бухте, так и в открытом море «цветение» фитопланктона обычно не наблюдается и, следовательно, кислород в процессе фотосинтеза не поставляется в верхний слой (рис.22). Основная причина такого дефицита в водах бухты – затраты кислорода на окисление органических веществ, поступающих с муниципальными стоками и с другими источниками загрязнения. При этом скорость убыли кислорода выше его поступления из атмосферы в поверхностный слой вод.

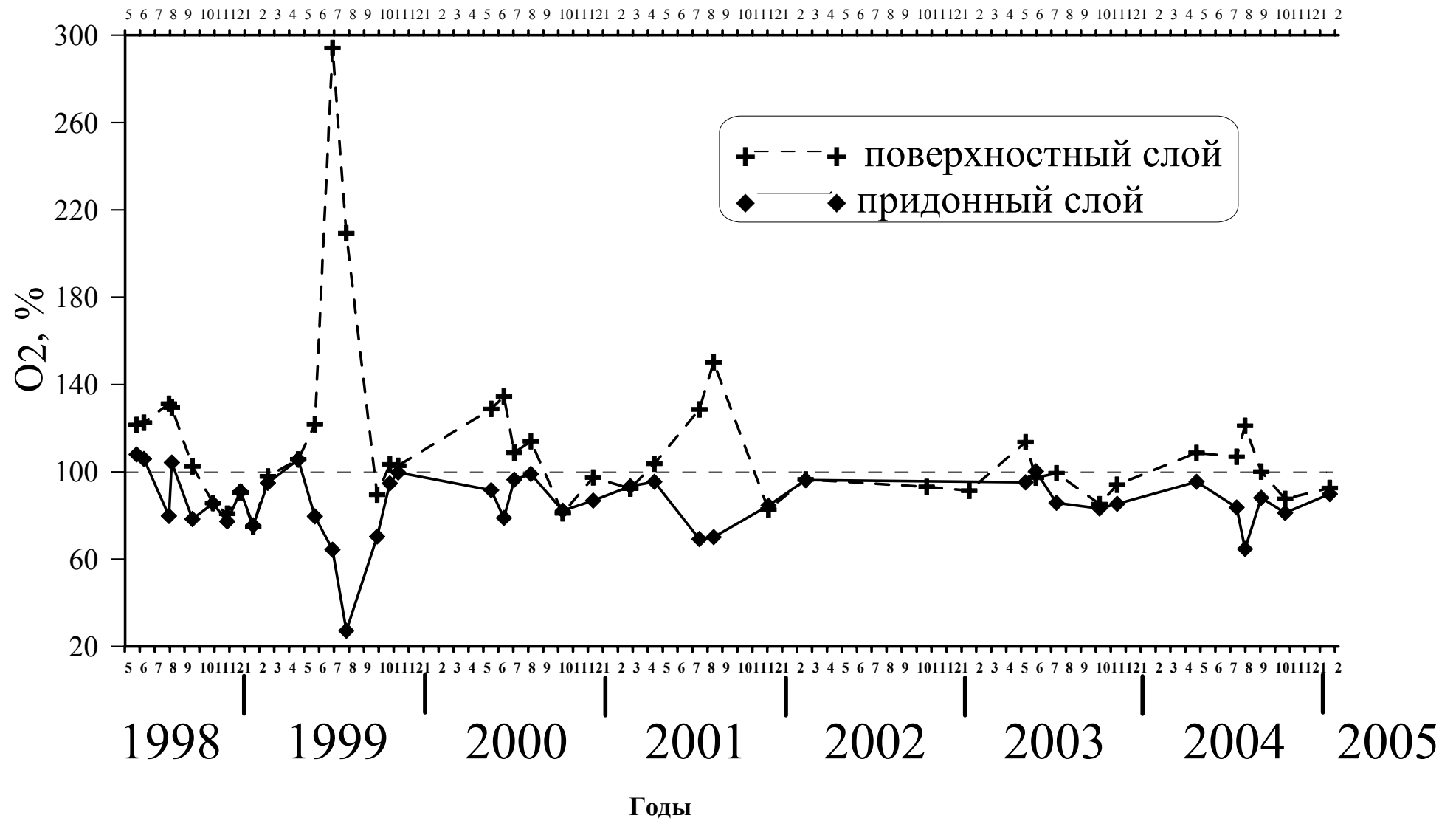


Рисунок 22. Межгодовые изменения содержания растворенного кислорода (% насыщение) в Южной бухте (1998-2005 гг.)

Биогенные вещества. Биогенные вещества – это материальная основа биотического круговорота и ведущий фактор в евтрофикации водоема. Содержание в воде Севастопольской бухты минеральных форм фосфатов, кремнекислоты, аммония, нитратов и нитритов находится в прямой зависимости от источников их поступления (речной и ливневый стоки, муниципальные и промышленные сточные воды и пр.), а также от степени их вовлечения в биологические процессы.

Результаты исследований, выполненных в 1998-2005 гг., показали (табл.1), что вследствие постоянной антропогенной нагрузки на экосистему бухты уровень концентрации биогенных веществ был выше их содержания в открытых прибрежных областях в 10-100 раз, однако случаи превышения ПДК единичны [7-9]. В большинстве случаев максимальное содержание биогенных веществ наблюдалось в зимний период, когда их потребление фитопланктоном резко снижается, а процессы деструкции органических веществ и высвобождения биогенных веществ замедляются.

Фосфаты. В период наблюдений концентрация минерального фосфора колебалась в широких пределах – от аналитического нуля до 1,6 мкМ в поверхностных водах и 0,00-0,74 мкМ в придонном слое (табл. 1). Среднее содержание фосфатов в водах поверхностного слоя составило (мкМ): весной – 0,12, летом – 0,05, осенью – 0,13, зимой – 0,10. В придонном слое средние значения минерального фосфора в зависимости от интенсивности внутриводоемных процессов могут быть выше (летом) или ниже (весной) примерно на 0,1 мкМ, чем на поверхности. Сравнение полученных в 2004-2005 гг. средних значений с наблюдениями 1998-2002 гг. указывает на некоторое снижение содержания минерального фосфора в Севастопольской бухте. Из рис.23 видно, что как в теплый, так и в холодный периоды в пространственном распределении фосфатов отмечаются обширные зоны, где они практически отсутствуют.

При анализе данных по хлорофиллу «а» было замечено, что обедненность поверхностных вод неорганическими формами фосфора не приводит к снижению уровня биомассы фитопланктона [57]. Очевидно, дефицит минерального фосфора компенсируется другими его формами или источниками, например, растворенным органическим фосфором. Другим фактором является то, что уровень первичной продукции определяется не только величиной запаса фосфора в водной массе, но и скоростью рециркуляции биогенных элементов в процессе биотического круговорота, которая в условиях Севастопольской бухты достаточно высока.

Отмеченное снижение содержания фосфатов в последние годы может быть связано как с уменьшением входного потока, так и с особенностями внутриводоемных процессов, в частности, с изменением размерного спектра потребляющих фосфаты организмов при

изменении трофического статуса акватории. В работе [42] указывается, что в условиях евтрофирования при преобладании в размерном спектре мелких организмов и увеличении суммарной экологической поверхности возможно возрастание потоков фосфора. Как известно, биота евтрофных вод характеризуется обилием мелких форм с короткими жизненными циклами и интенсивным метаболизмом, что обуславливает быстрый круговорот фосфора.

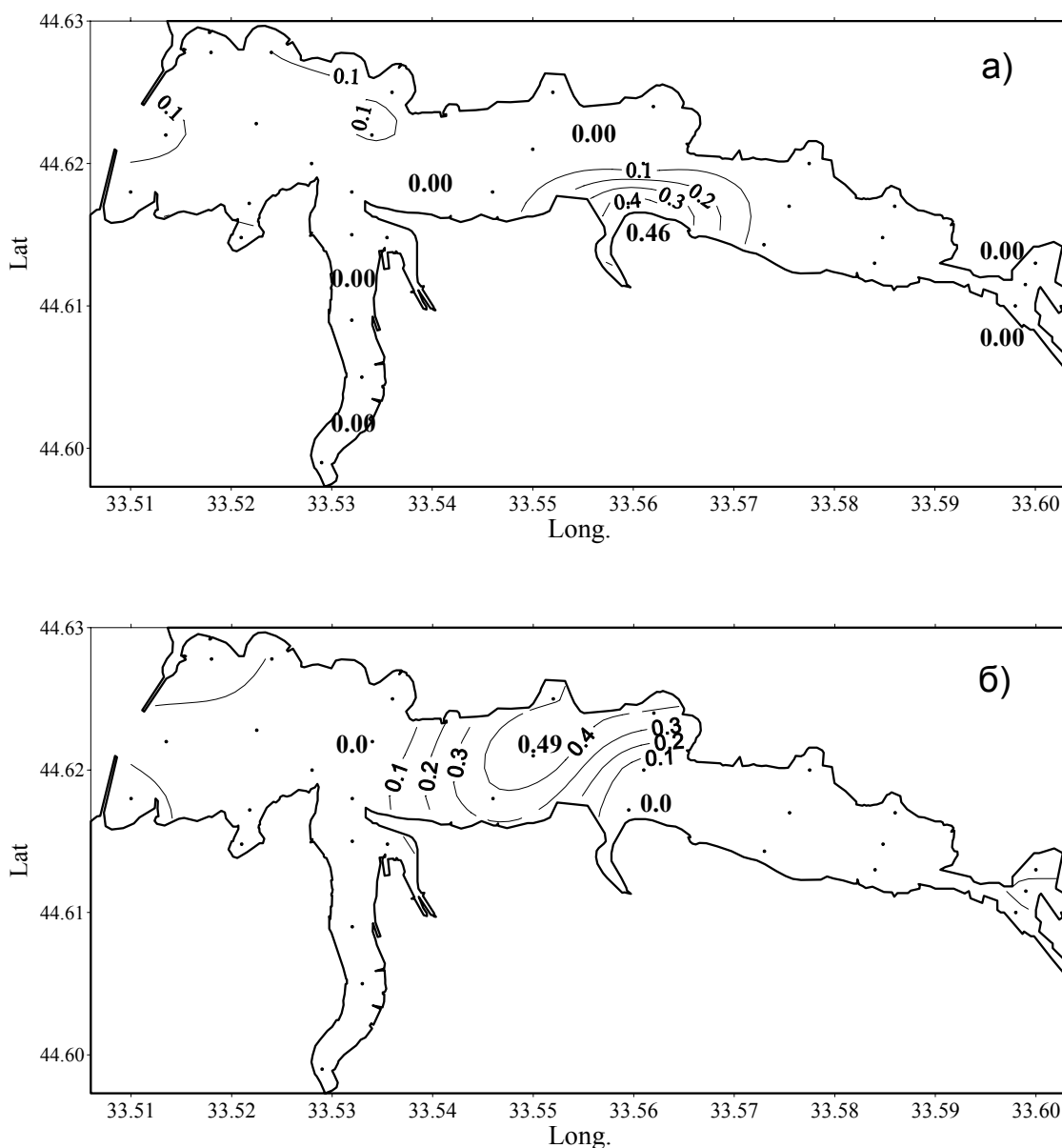


Рисунок 23. Минеральный фосфор, мкМ в поверхностном слое бухты летом 2004 г (а) и зимой 2005 г (б)

Для условий Севастопольской бухты это подтверждается экспериментальными данными, полученными с использованием ^{32}P . Так в работах М.В. Кириковой по скорости поглощения фосфора микропланктонным сообществом в бухте было показано, что при низкой концентрации фосфатов преимуществом в их потреблении обладают более мелкие

фракции фитопланктона и бактериопланктона. При этом скорость потребления минерального фосфора подвержена существенным вариациям. Она увеличивается в весенне-летний период и снижается зимой. Время оборота фосфора также в значительной мере зависит от сезона. Максимальные значения характерны для осенне-зимнего периода (60-300 часов), тогда как в весенне-летний период время оборота резко уменьшается и может составлять менее одного часа.

Кремний. В период наблюдений среднее содержание кремния колебалось в пределах 0,60-12,3 мкМ в поверхностных водах бухты и 0,60-13,1 мкМ в придонных (табл. 1). При этом максимальные значения отмечались на поверхности (зимой - до 65 мкМ и осенью – до 15 мкМ). Сезонное распределение кремния определяется такими основными факторами как гидродинамика вод, речной сток, потребление диатомовыми водорослями и поступление в водную фазу в результате деструкции органического вещества. В различное время года каждый из этих факторов может иметь преобладающее значение и, таким образом, определять особенности пространственного распределения кремния. В качестве примера на рис. 24 представлено распределение кремния летом (июль 2004 г.) и зимой (январь 2005 г.). В июле 2004 г. средние концентрации кремния и пределы колебаний составляли 4,7 (3,7-8,0) мкМ на поверхности и 5,9 (3,8-13,1) мкМ у дна. Эти значения заметно выше, чем наблюдаемые зимой (январь 2005г.), что само по себе является необычным, ибо максимальные концентрации кремния, как правило, наблюдаются при зимнем половодье [7,9,11]. Пространственное распределение в значительной мере определялось гидрофизическими факторами. Изменчивость ветрового режима привела к образованию на поверхности системы круговоротов с повышенной концентрацией кремния и пониженной соленостью (район бухты Голландия) и с пониженной концентрацией кремния и повышенной соленостью в районах бухт Куриной (ст.14-16) и Сухарной (ст.8-10).

Как отмечалось ранее при обсуждении термогалинной структуры, за сутки до съемки в июле 2004 г под действием юго-западного ветра установился западный поток в бухту из открытого моря, который проявлялся по повышенной солености у северного берега бухты. Эти же воды отличались пониженными концентрациями кремния (рис. 24 а). Максимальные концентрации кремния в кутовой части Южной бухты обусловлены как динамическими факторами (затрудненным водообменом с главной бухтой), так и внутриводоемными процессами – поступлением кремния при деструкции органического вещества и с распресненными сточными водами и при разгрузке подземных вод.

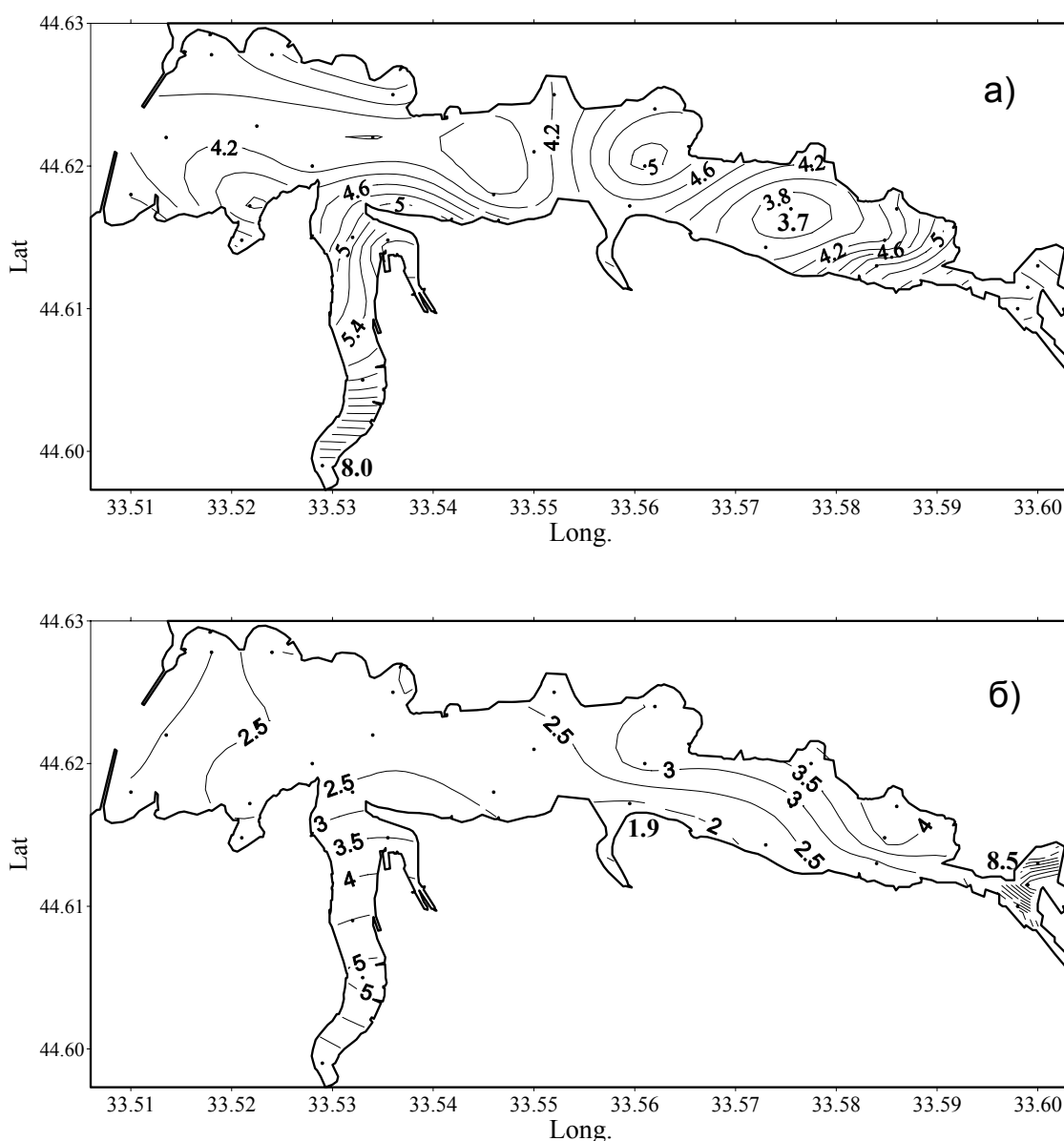


Рисунок 24. Кремнекислота, мкМ в поверхностном слое бухты летом 2004 г (а) и зимой 2005 г (б)

В январе 2005 г. максимальные концентрации кремния 8,5 мкМ отмечались в распресненных (соленость 16,56) поверхностных водах в устье реки Черной (Инкерманский ковш), что обусловлено поступлением обогащенных кремнием речных вод. В распространившемся от устья реки потоке распресненных и более холодных вод, которыми была занята северо-восточная часть вершины бухты, также наблюдались повышенные концентрации кремния – от 3,0 до >4,0 мкМ. Повышенными концентрациями кремния характеризовалась и кутовая часть Южной бухты. Из анализа термогалинной структуры видно, что в результате адвекции вод из сопредельной области восточная и центральная части Севастопольской бухты были заняты более солеными ($\geq 17,9$) и теплыми ($> 7,9-8,2$ °C) водами с низким содержанием кремния ($\leq 2,0$ мкМ), которые, распространяясь вдоль южного берега, затрудняли водообмен бухты Южной с

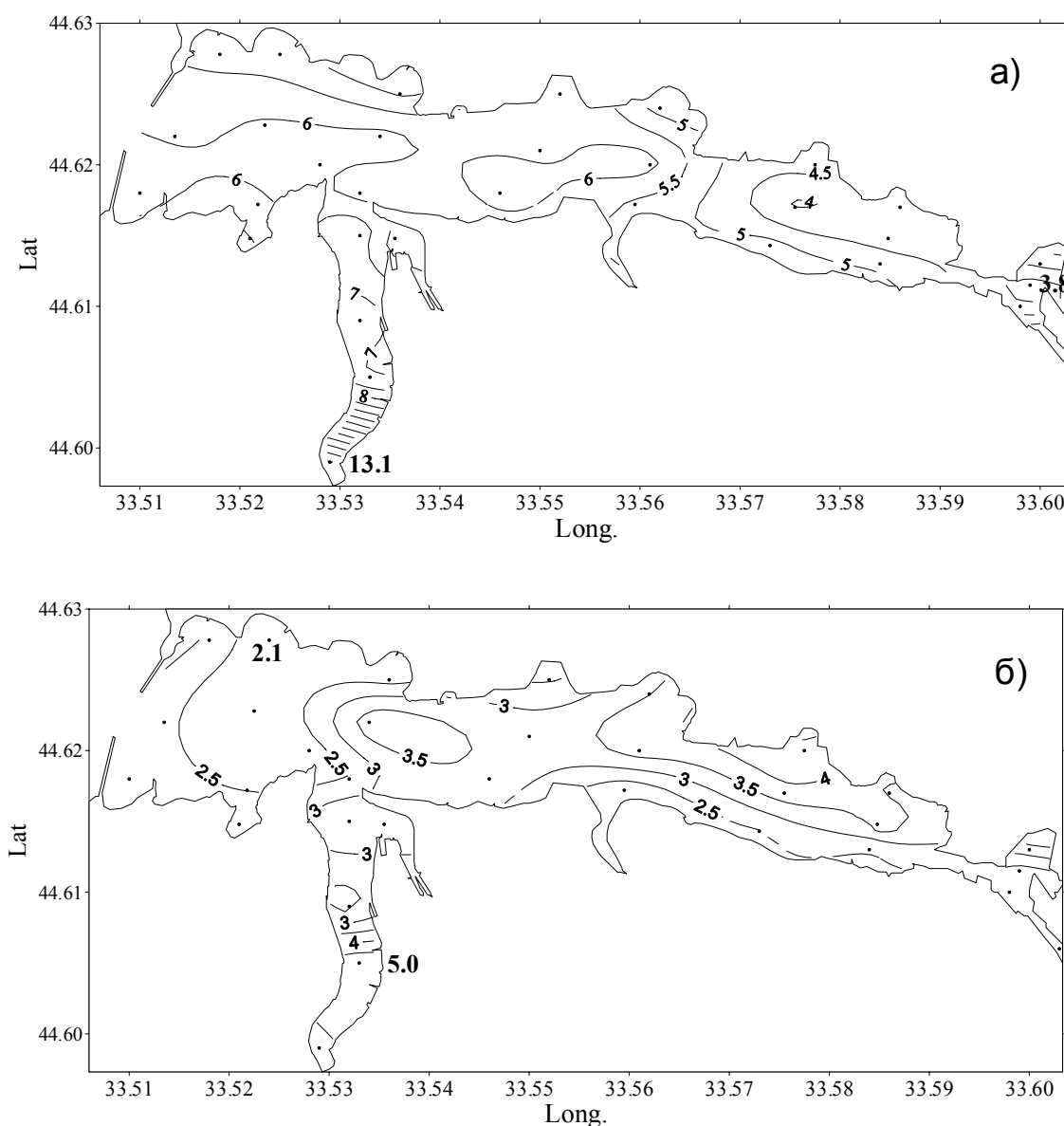


Рисунок 25. Кремнекислота, мкМ в придонном слое бухты летом 2004 г (а) и зимой 2005 г (б)

Севастопольской бухтой, чем в определенной мере и объясняются максимальные концентрации кремния и других биогенных веществ в Южной бухте. Распределение кремния в придонной части более мозаично. При этом структура вод в поле кремния не только подтверждает особенности термогалинной структуры, связанной с формированием системы круговоротов и приповерхностных линз, но и уточняет их генезис (рис. 25).

Как было отмечено выше, сравнение содержания кремния летом 2004 г. и зимой 2005 г. указывает на не совсем обычный характер сезонного распределения этого параметра. Максимальные концентрации наблюдались летом, в период межени, тогда как минимальные найдены в зимний сезон. По-видимому, это связано с объёмами речного стока, а также с характером и масштабами биологического потребления кремния.

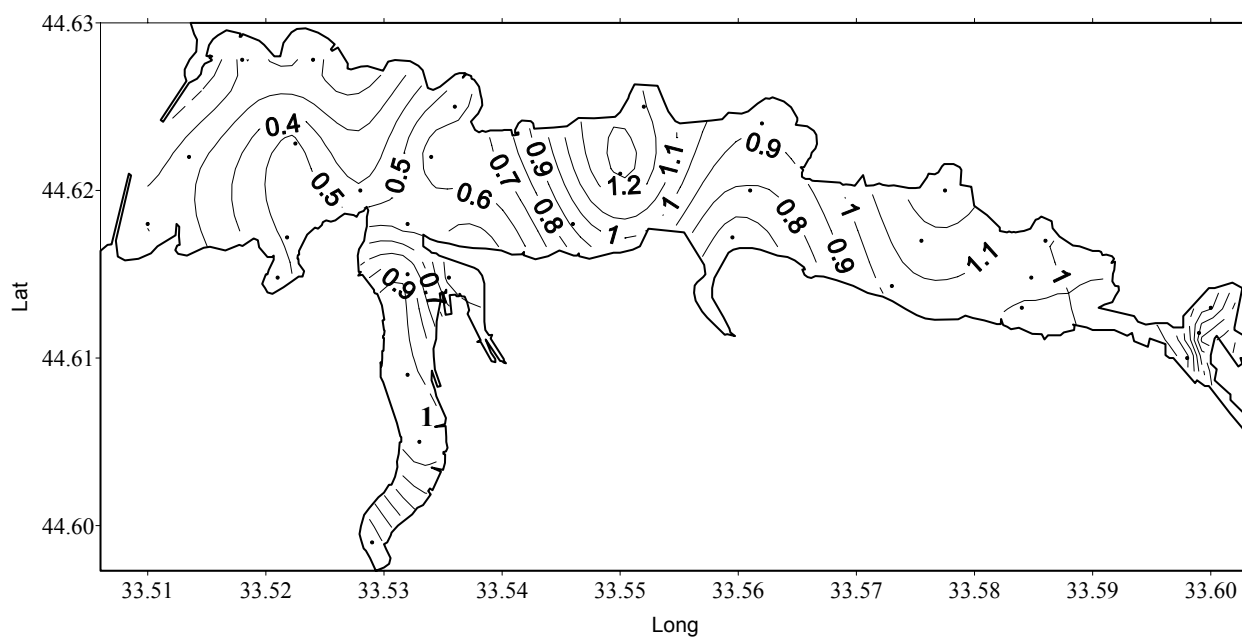


Рисунок 26. Распределение хлорофилла "а", мг/м^3 в поверхностном слое бухты зимой 2005г

Холоднолюбивые виды фитопланктона (диатомовые) получают максимальное развитие в зимне-весенний период.

При сравнительном анализе распределения кремния (рис. 25 б) и хлорофилла «а» в январе 2005 г. (рис. 26) видно, что зоны с высокими концентрациями кремния характеризуются повышенным содержанием хлорофилла. Это свидетельствует о том, что кремний в Севастопольской бухте не может быть лимитирующим фактором для потребляющего кремний планктона. В распределении хлорофилла четко просматривается влияние гидродинамического и термогалинного фактора. Приповерхностным линзам с более холодной ($7,6-7,7^\circ\text{C}$) и менее соленой ($\leq 17,80$) водой с относительно высокими ($>2,5-4,0$ мкМ) концентрациями кремния соответствует максимальное содержание хлорофилла «а».

Минеральные формы азота. Суммарное содержание минеральных соединений азота (нитратных, нитритных и аммонийных), наряду с фосфатами, в значительной степени определяет трофическое состояние водного объекта.

Нитраты. Диапазон изменчивости средних концентраций нитратов в поверхностных водах (табл. 1) определяется минимальными значениями летом ($4,8$ мкМ) и максимальными зимой (11 мкМ). В придонном слое средние концентрации были заметно ниже. Минимальные концентрации ($0,54$ мкМ) отмечались весной, а максимальные ($4,5$ мкМ) – осенью. Экстремальные величины были гораздо выше и составляли $0,12-141$ мкМ на поверхности и $0,00-9,7$ мкМ у дна. Высокие концентрации

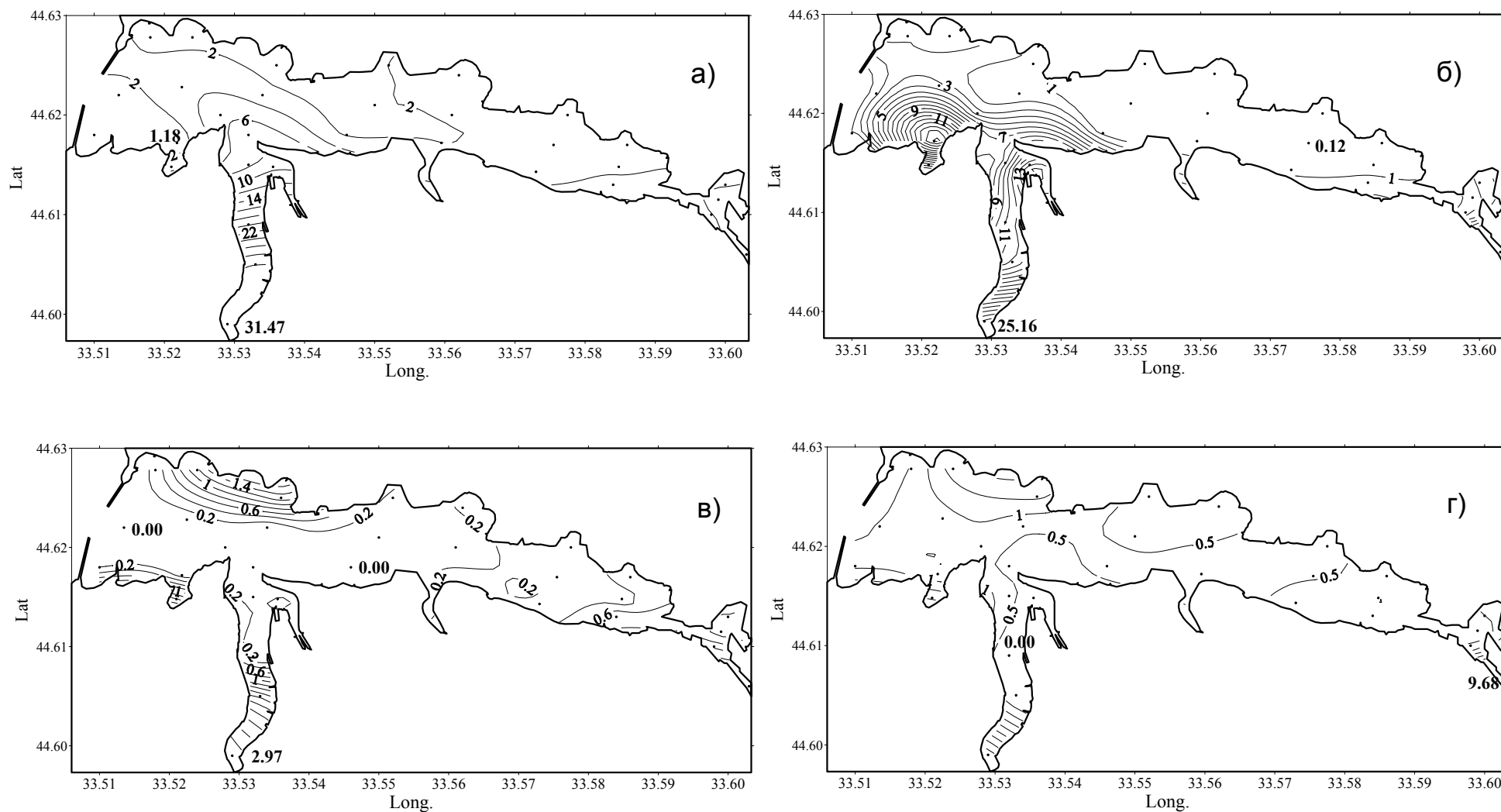


Рисунок 27. – Нитраты, μM в Севастопольской бухте: весной 2004 г. в поверхностном (а) и придонном (в) слоях; летом 2004 г в поверхностном (б) и придонном (г) слоях.

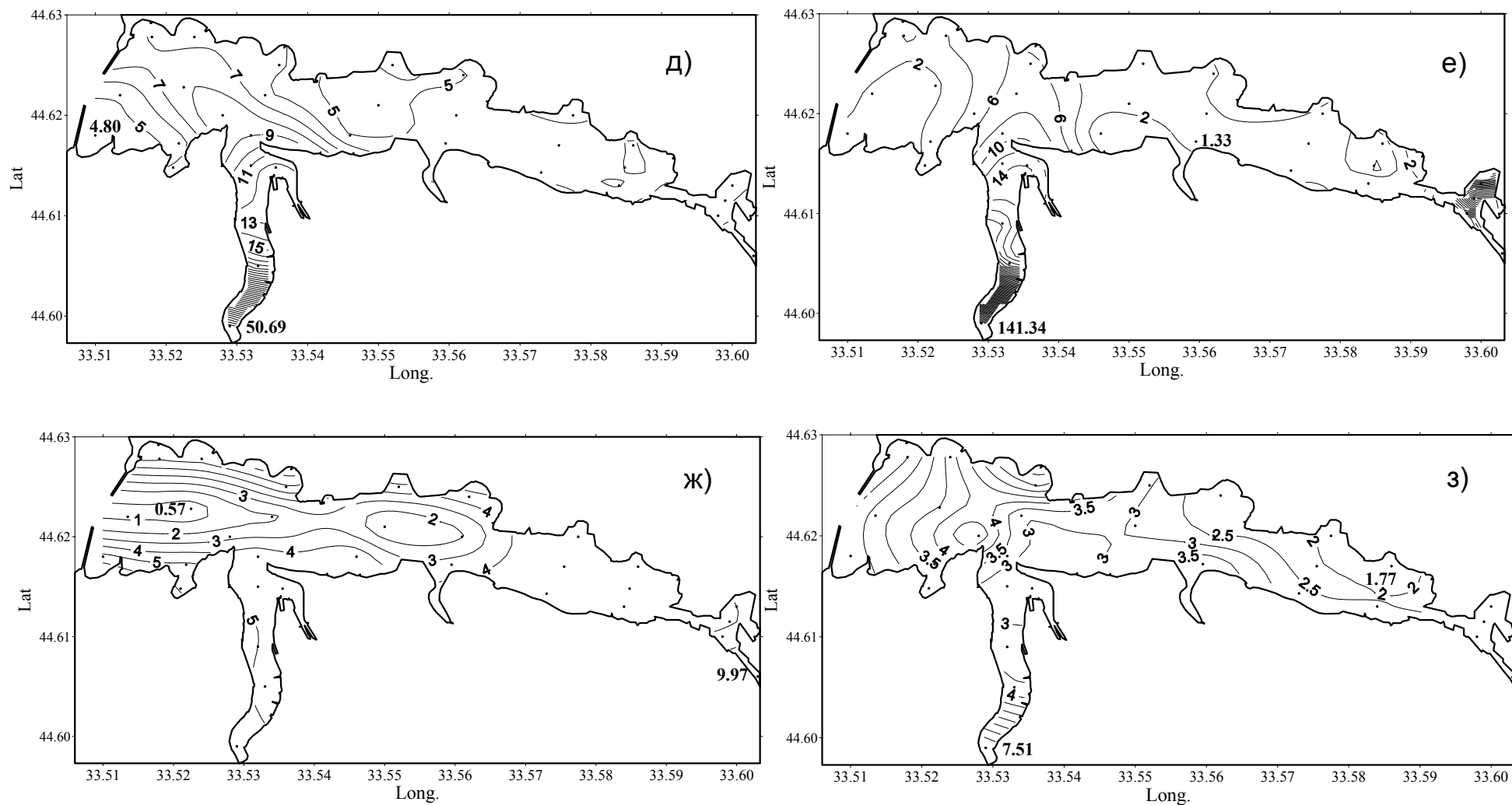


Рисунок 27. (продолжение) Нитраты, мкМ в Севастопольской бухте: осенью 2004 г. в поверхностном (д) и придонном (ж) слоях; зимой 2005 г в поверхностном (е) и придонном (з) слоях.

нитратов наблюдались в поверхностных водах Южной бухты (ст.17-19, рис. 1) ежегодно, однако максимальные значения были обнаружены осенью 2004 г. (>50 мкМ) и зимой 2005 г. (>140 мкМ). Подобное положение наблюдалось и ранее, в 1998-2002 гг. [7,10], что свидетельствует о возрастающем масштабе загрязнения Южной бухты сточными водами. Формирование максимальных концентраций биогенных веществ в Южной бухте в значительной мере определяется и гидрологической ситуацией. Так, положение усугубляется в том случае, когда водообмен с центральной частью бухты затруднен, что и было характерным для съёмов осенью 2004 г. и зимой 2005 г. Рассмотрим распределение нитратов при различных гидрометеорологических и гидрологических ситуациях.

Распределение нитратов в поверхностных водах в апреле 2004 г. при северо-восточных и восточных ветрах (рис. 27 а) определялось поступлением через входной пролив вод с повышенной соленостью ($>17,8$) и низким содержанием нитрат-иона ($<2,0$ мкМ). Эти воды занимали всю Севастопольскую бухту за исключением Южной бухты, которая была заполнена распресненными водами ($>17,5$). В Южной бухте концентрация нитрат-иона увеличивалась от $>6,0$ мкМ у входа до $31,5$ мкМ в кутовой части бухты. В «свежих», поступивших через входной пролив придонных водах с соленостью $\geq 18,00$, наблюдались низкие ($0,00-0,02$ мкМ) концентрации $N-NO_3$ и лишь в водах вершины бухты (ст.17-19) концентрация нитратов была заметно выше – от $0,6$ до $2,97$ мкМ (рис 27 в).

В июле 2004 г., в условиях стагнации вод и высокой плотностной стратификации уровни концентрации и пространственное распределение нитратов определялось объёмом и локализацией сточных вод, а также потреблением фитопланктоном. Под воздействием ветров южных румбов влияние сточных вод из Артиллерийской бухты и кутовой части Южной бухты распространилось на всю восточную часть главной бухты, чем и были обусловлены повышенные концентрации нитратов на поверхности – от ≥ 3 до $25,1$ мкМ (рис. 27 б). На остальной части акватории Севастопольской бухты содержание нитратного азота было минимальным ($<0,12-1,0$ мкМ). Пониженное содержание $N-NO_3$ в центральных и восточных частях бухты обусловлено потреблением фитопланктоном, массовое «цветение» которого наблюдалось в июле. В придонных водах на всей акватории Севастопольской бухты (рис.27 г) наблюдались низкие значения концентраций ($0,00-0,5$ мкМ). Здесь, помимо потребления фитопланктоном, нитраты используются денитрифицирующими бактериями. При недостатке кислорода в воде на окисление органического вещества затрачивается кислород нитратов.

В октябре 2004 г. во время съёмки преобладали ветры южных румбов. В результате этого дрейфовое течение, направленное вдоль оси Севастопольской бухты, выносило из

Южной бухты загрязненные поверхностные воды, содержащие в кутовой части $>50,0$ мкМ нитратов (рис. 27 д). Поэтому восточная часть бухты была занята водами с более высокими концентрациями N-NO_3 (6-9 мкМ), чем западная часть (≤ 5 мкМ). В придонном слое воды компенсационного течения, поступившие в бухту, содержали минимальные концентрации нитратов – от 0,57 до 2 мкМ (рис. 27 ж). Восточная часть бухты и Южная бухта характеризовались гомогенным распределением нитратов (рис. 27 ж).

Зимой в бухте наблюдается максимальное содержание нитратов. При среднем значении 10,9 мкМ пределы колебаний составляют от 1,3 до 140 мкМ (рис. 27 е). В январе 2005 г. в период съёмки при преобладании ветров южных румбов произошла перестройка циркуляции и термогалинных полей. Поверхностным течением, направленным на север, воды, обогащенные нитратами, выносились из Южной бухты и достигали Северной бухты. В придонном слое обогащенные нитратами воды выносились за пределы Севастопольской бухты активизирующимся в такие периоды компенсационным течением (рис. 27 з). Особенностью динамики вод в придонном слое было формирование системы круговоротов, которые проявлялись не только в поле термогалинных характеристик, но и при распределении нитратов (рис. 27 ж, з). В данном случае высокие градиенты нитратов служат хорошим химическим трассером для демонстрации динамики водных масс. Кроме того, пределы сезонных колебаний отражают степень трофности водоёма и его загрязнения.

Нитриты. Будучи нестойким промежуточным продуктом окислительно-восстановительных процессов в морской воде, нитриты в открытых водах олиготрофных районов океана обычно присутствуют в невысоких концентрациях – от аналитического нуля до 0,01-0,05 мкМ [45]. В то же время в океанических зонах апвеллинга в слое с низким содержанием кислорода наблюдается повышенное содержание нитритов. В прибрежных областях, которые подвержены постоянному антропогенному влиянию, наличие нитритов чаще всего свидетельствует о загрязнении акватории сточными водами, и являются хорошим показателем темпов минерализации органического вещества (ОВ).

Содержание нитритов в Севастопольской бухте (табл. 1) колебалось в поверхностных водах от максимальных значений весной (0,09-5,06 мкМ) до минимальных осенью (0,04-0,24 мкМ) и в придонных водах – от 0,00 до 1,88 мкМ весной и в пределах 0,04-0,24 мкМ осенью. Как видно из приведенных данных и рис. 28, максимальные концентрации нитритов в период наблюдений отмечались весной, хотя обычно высокие значения были характерны для ситуаций летней стагнации, когда к концу лета – началу осени идет интенсивный процесс деструкции накопившегося за лето ОВ. Анализ особенностей распределения нитритов весной 2004 г. (рис. 28 а) позволяет предположить

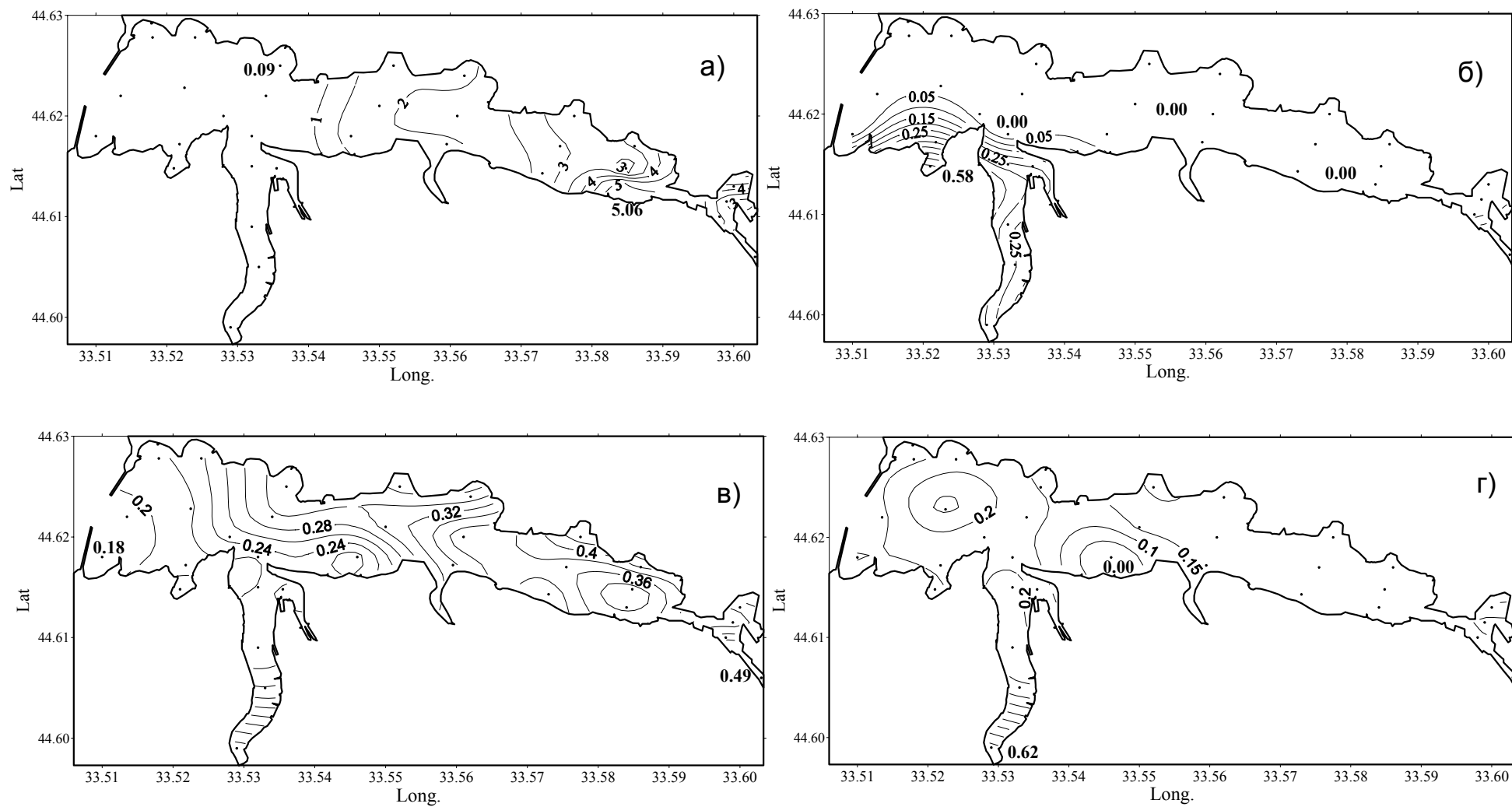


Рисунок 28. Нитриты (мкМ) в поверхностном слое бухты весной (а), летом (б) и осенью (в) 2004 г и зимой 2005 г (г)

две вероятные причины максимального содержания $N-NO_2$ в данный период: 1) поступление ОВ с речным стоком и вследствие весеннего «цветения»; 2) поступление ОВ с локальным сбросом сточных вод. Наблюдаемые максимальные величины концентрации нитритов в поверхностных водах бухты более чем в три раза превышают предельно допустимые концентрации для акваторий рыбохозяйственного водопользования ($ПДК_{вр} = 0,02 \text{ мгN/л}$ или $1,43 \text{ мкМ}$) [46].

Приуроченность максимальных концентраций к поверхностному слою свидетельствует о значительном вкладе сточных вод в поставку нитритов и о второстепенной роли природных процессов в образовании нитритов в бухте.

Аммоний. Максимальные концентрации аммония (до $8,50 \text{ мкМ}$) наблюдались летом (табл.1), когда процессы бактериальной деструкции ОВ усиливаются, а потребление аммония фитопланктоном снижается. В осенний период среднее содержание и пределы колебаний снижались, но оставались достаточно высокими (от $0,03$ до $3,15 \text{ мкМ}$), так как продолжалась деструкция ОВ. Самые низкие концентрации аммония в период исследования отмечались зимой. При среднем содержании $0,3-0,5 \text{ мкМ}$ пределы колебаний составляли $0,0-1,85 \text{ мкМ}$.

Характер пространственного распределения аммония (рис. 29) указывает, что помимо речного стока значительный вклад в поступление аммония в Севастопольскую бухту вносят точечные источники загрязнения. Высокие концентрации наблюдались во все сезоны в Южной и Артиллерийской бухтах в местах сброса сточных вод.

Выполненные в 1990-1993 гг. исследования в восточной части бухты показали, что биогенная нагрузка на исследуемую акваторию в зоне влияния выпуска хозяйственно-бытовых сточных вод весьма значительна. Изменения гидрохимического фона морской воды проявлялось высокой концентрацией фосфатного фосфора, аммиачного и органического азота, а также избыточной концентрацией нитритного азота, превышающей ПДК. Концентрация $N_{орг}$ в загрязненных водах превышала среднюю концентрацию по бухте в 3-4 раза. В августе 1993 г. концентрация кислорода в поверхностном слое в зоне сброса составляла всего лишь $3,91 \text{ мл/дм}^3$, что ниже нормы ПДК [57]. Таким образом, мелководные выпуски сточных вод в бухту представляют значительную опасность для качества морской воды.

Водородный показатель (pH) и общая щелочность. Величина pH в воде бухты зависит прежде всего от содержания свободного диоксида углерода (CO_2) и величины общей щелочности, т.е. от состояния карбонатной системы. Выполненные наблюдения показали, что в воде бухты средние величины водородного показателя при межсезонных изменениях (табл. 1) колеблются в пределах $8,35-8,40$ в поверхностном слое и $8,26-8,39$ –

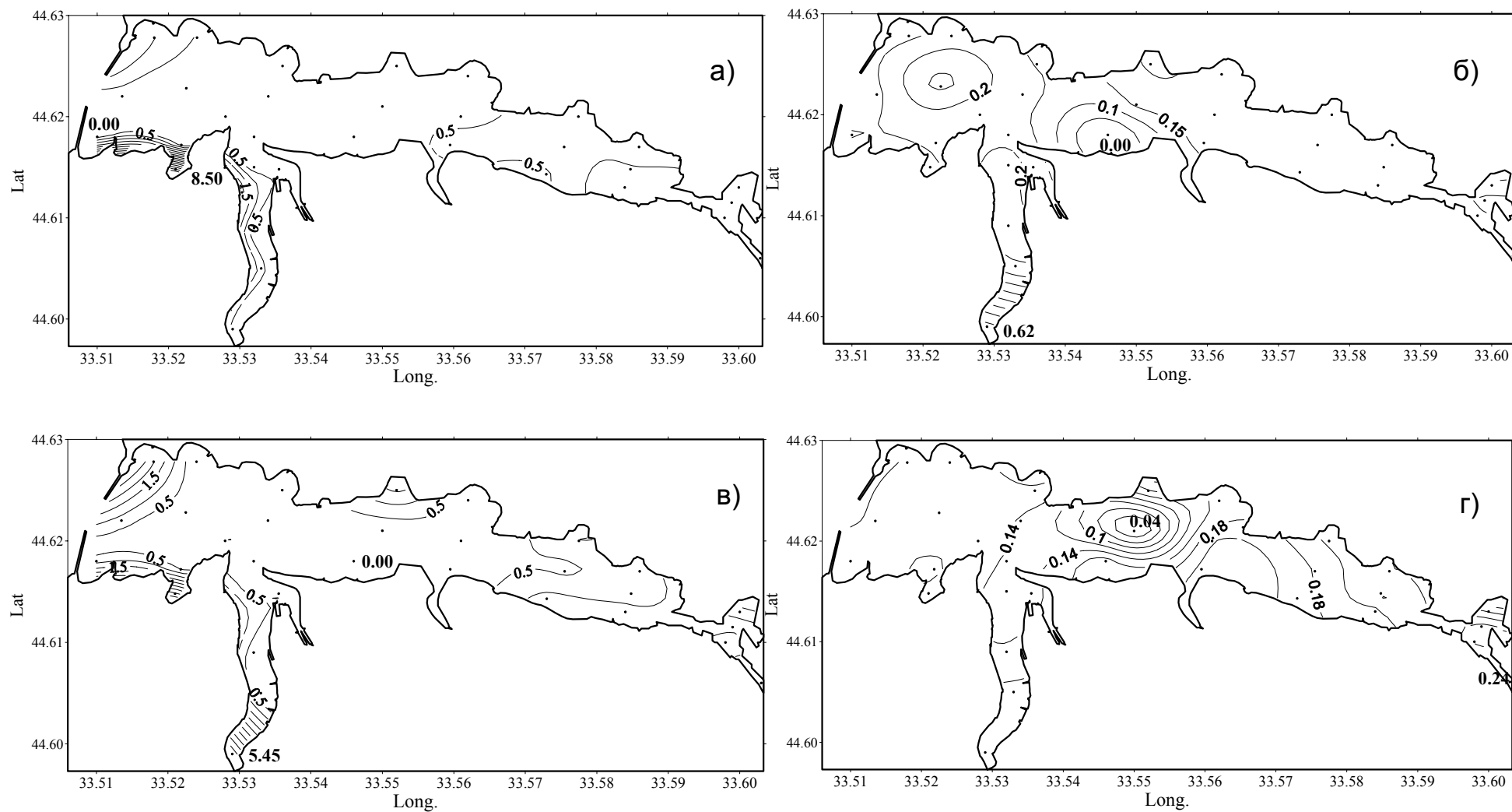


Рисунок 29. Ионы аммония (μM) в Севастопольской бухте летом 2004 г в поверхностном (а) и придонном (в) слоях и зимой 2005 г в поверхностном (б) и придонном (г) слоях

в придонном. Основной тенденцией распределения pH во всей толще вод бухты является постепенное понижение значений от выхода из бухты к вершине бухты в случаях, когда сказывается влияние речного стока. В районе выхода из бухты сказывается влияние открытой части моря. В ее вершине величину pH определяет количество карбонатов, приносимое со стоком реки Черной (pH речной воды 7,2-8,0). На остальной части бухты величина pH определяется соотношением интенсивности процессов фотосинтеза (при массовом развитии фитопланктона повышается потребление CO_2 и соответственно увеличивается pH) и минерализации ОВ (pH понижается при интенсивной деструкции ОВ). Пределы колебаний pH по данным исследований составляли от 8,15 до 8,91 на поверхности и 7,91-8,57 у дна. На фоне такой основной тенденции прослеживались и локальные пятна, обусловленные местными источниками загрязнения.

Средние величины щелочности менялись в поверхностном слое бухты от 3,31 мг-экв/л летом и осенью до 3,35 мг-экв/л зимой и весной (табл. 1). Южная бухта и вершина Севастопольской бухты отличались наибольшим разбросом данных в течение года. Для открытого моря за пределами бухты среднее значение щелочности составляло 3,32 мг-экв/л. Максимальное значение щелочности (3,76 мг-экв/л) отмечено в поверхностном слое вод Южной бухты в январе 1999 г., когда наблюдался дефицит кислорода (около 80% нас.). В придонном слое щелочность менялась от 3,22 мг-экв/л летом и осенью до 3,68 мг-экв/л зимой. Диапазоны сезонной изменчивости в придонном слое были меньше по сравнению с поверхностными водами, что связано как с загрязнением сточными водами, так и с процессами фотосинтеза.

Особенности карбонатной системы вод бухты в условиях длительной антропогенной нагрузки.

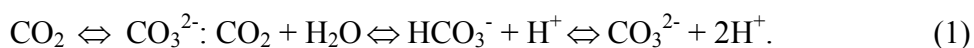
Карбонатная система морских вод представляет собой одно из самых сложных химических равновесий, которое играет важную роль в процессах взаимодействия атмосферы и моря, в химии морской воды и в накоплении донных осадков.

Анализ керна льда из Антарктиды за последние 160000 лет показал, что за время индустриального периода атмосферное парциальное давление CO_2 увеличилось с 280 мкатм до 364 мкатм к 1997 году. При условии развития хозяйственной деятельности человечества по существующему ныне технократическому сценарию концентрация углекислого газа достигнет 700 мкатм к 2100 году [47]. В работах многих авторов [48-51] утверждается, что Мировой океан является стоком для атмосферного CO_2 , и существует явная опасность того, что океаны окажутся не в состоянии поглотить избыток CO_2 в атмосфере. Однако, существует и другая точка зрения: в стационарном состоянии

количество образующегося в воде и отлагающегося на дне океана карбонатного углерода должно быть эквивалентно количеству CO_2 , выделяющегося из океана в атмосферу [52]. Причину возникшего противоречия авторы работы [52] связывают со слабой изученностью процессов газообмена в прибрежных акваториях и утверждают, что с получением более детальной информации оценки потоков CO_2 на границе раздела океан – атмосфера могут измениться.

Несмотря на важность проблемы, она остается недостаточно изученной. Поэтому целью данной работы являлся анализ современного состояния карбонатной системы в Севастопольской бухте. Ранее в устьевой части Севастопольской бухты производились эпизодические наблюдения за сезонной динамикой компонентов карбонатной системы на одной фиксированной станции у выхода из бухты [27, 53]

Карбонатную систему в морских водах можно представить как совокупность равновесий циклического процесса



Анализ динамики компонентов карбонатной системы показал, что содержание свободного диоксида углерода в поверхностных водах испытывает весьма заметные сезонные колебания, которые связаны с изменениями активности фотосинтеза, гидродинамики и режима температуры [13].

Результаты исследований сводятся к анализу содержания каждого компонента приведенных реакций в водах Севастопольской бухты за период с 1998 по 2005 год.

Диоксид углерода CO_2 . Концентрация диоксида углерода в течение наблюдаемого периода изменялась от 5,9 мкмоль/кг (июнь 1999 г.) до 20,0 мкмоль/кг (ноябрь 1998 г.) в поверхностном слое и от 8,5 мкмоль/кг (ноябрь 1998 г.) до 20,0 мкмоль/кг (июнь 2003 г.) – в придонном (рис.30). В годовом ходе CO_2 в поверхностном слое вод минимальные концентрации приходятся на теплые месяцы (июнь-июль), а максимальные – на холодные: (ноябрь – февраль). Для придонного слоя вод выраженного сезонного хода не наблюдалось. По абсолютным значениям концентрации CO_2 в придонном и поверхностном слоях отличаются незначительно. Среднее значение концентраций в придонном слое равно 14,6 мкмоль/кг, а в поверхностном – 12,2 мкмоль/кг. Статистический анализ концентрации диоксида углерода и насыщения воды кислородом выявил высокую отрицательную корреляционную зависимость ($r = -0,72$) для поверхностного слоя вод. Для придонного слоя такой зависимости не было выявлено.

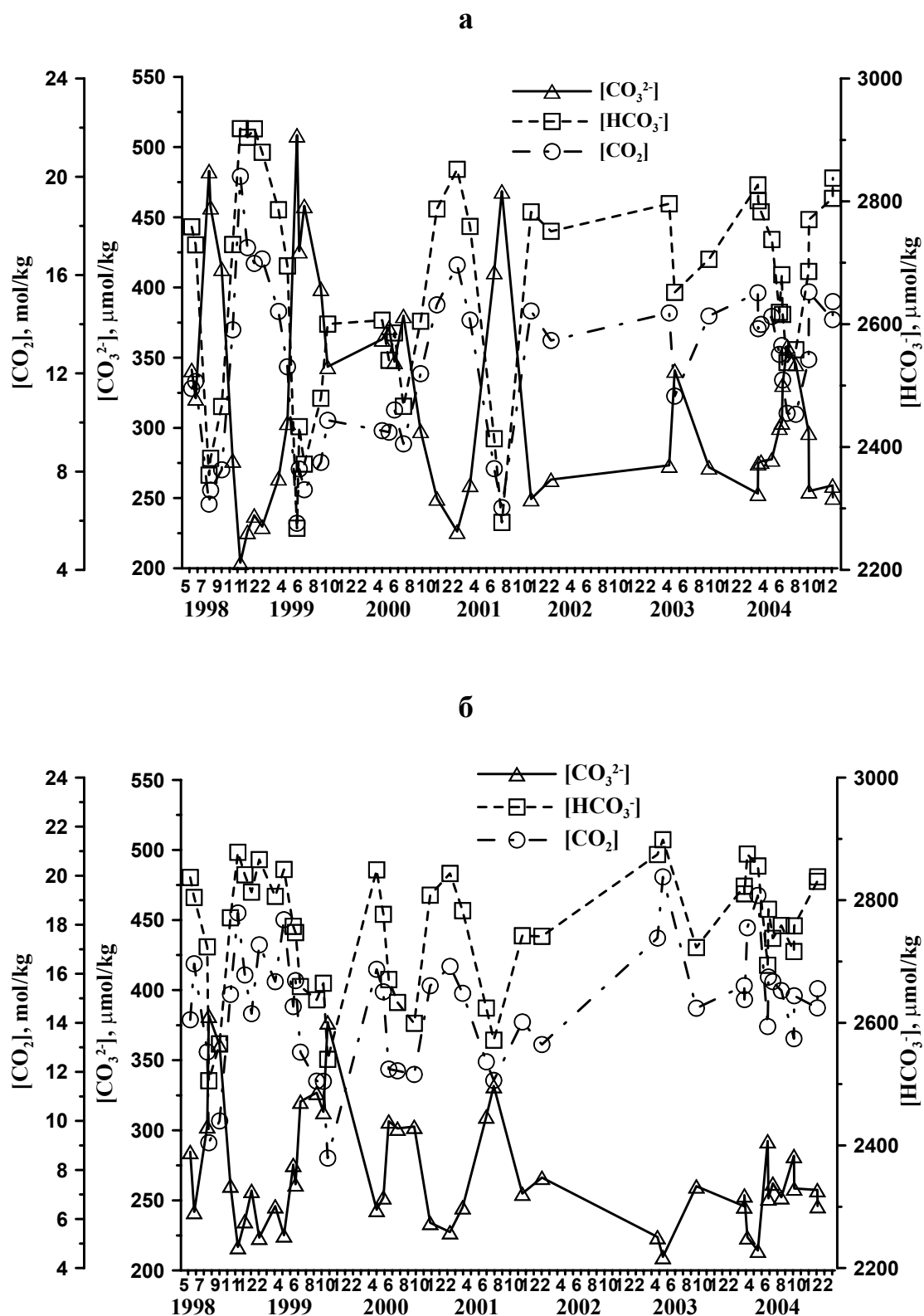
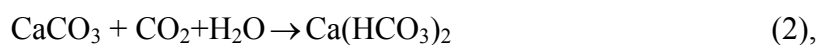


Рисунок 30. Сезонное изменение концентраций диоксида углерода, карбонатного и гидрокарбонатного ионов (а-поверхностный слой, б-придонный слой)

Гидрокарбонатный ион HCO_3^- . Очень важным источником пополнения гидрокарбонатными ионами вод шельфовой зоны моря является материковый сток. Поэтому, как видно из рис.30, увеличение концентраций HCO_3^- в период половодья (с декабря по апрель) и уменьшение в летние месяцы являются закономерными. В поверхностном слое вод Севастопольской бухты такой сезонный ход ярко выражен. Для придонного слоя он также сохраняется, но диапазон изменения значений меньше, чем для поверхностного слоя. Колебания концентраций гидрокарбонатного иона в поверхностном слое находились в диапазоне 2268 мкмоль/кг (июнь 1999 г.) – 2918 мкмоль/кг (ноябрь 1998 г.). В придонном слое концентрации изменялись от 2506 мкмоль/кг в августе 1999 г. до 2899 мкмоль/кг в июне 2003 г. Очевидно, что диапазоны изменения концентраций в придонном слое меньше, чем в поверхностном. Время максимума и минимума концентраций преимущественно совпадает, кроме того, для придонного слоя в мае – начале июня наблюдался промежуточный максимум: 2837 мкмоль/кг (май 1998 г.), 2850 мкмоль/кг (май 1999 г.), 2850 мкмоль/кг (май 2000 г.), 2875 мкмоль/кг (май 2003 г.), 2855 мкмоль/кг (июнь 2004 г.). Среднее значение концентрации гидрокарбонатного иона в придонном слое (2753 мкмоль/кг) выше, чем в поверхностном (2656 мкмоль/кг).

Кривые изменения содержания гидрокарбонатного иона и диоксида углерода имеют аналогичный характер во все сезоны. Коэффициент корреляции между концентрацией гидрокарбонатного иона и насыщением воды кислородом в поверхностном слое равен – 0.64. Для придонного слоя корреляции выявлено не было.

Карбонатный ион CO_3^{2-} . Основное количество растворенных карбонатов в материковом стоке связано с растворением карбонатных пород, происходящим при участии атмосферного CO_2 с образованием растворенных бикарбонатов:



Поэтому карбонатному иону свойственен противоположный характер сезонного изменения по сравнению с насыщением вод двуокисью углерода и бикарбонатным ионом. Обнаруженные в летние месяцы максимальное значение концентрации CO_3^{2-} , уменьшаясь в течение осени, к декабрю-январю достигает минимума. В поверхностном слое вод бухты значения концентраций карбонат - ионов изменяются от 204 мкмоль/кг в ноябре 1998 г. до 509 мкмоль/кг в июне 1999 г., при среднем значении 314 мкмоль/кг (рис.30).

В придонном слое для концентраций карбонатного иона характерен меньший, по сравнению с поверхностным, разброс значений: от 210 мкмоль/кг в июне 2003 года до 382 мкмоль/кг в августе 1998 года, при среднем значении 264 мкмоль/кг. Коэффициент

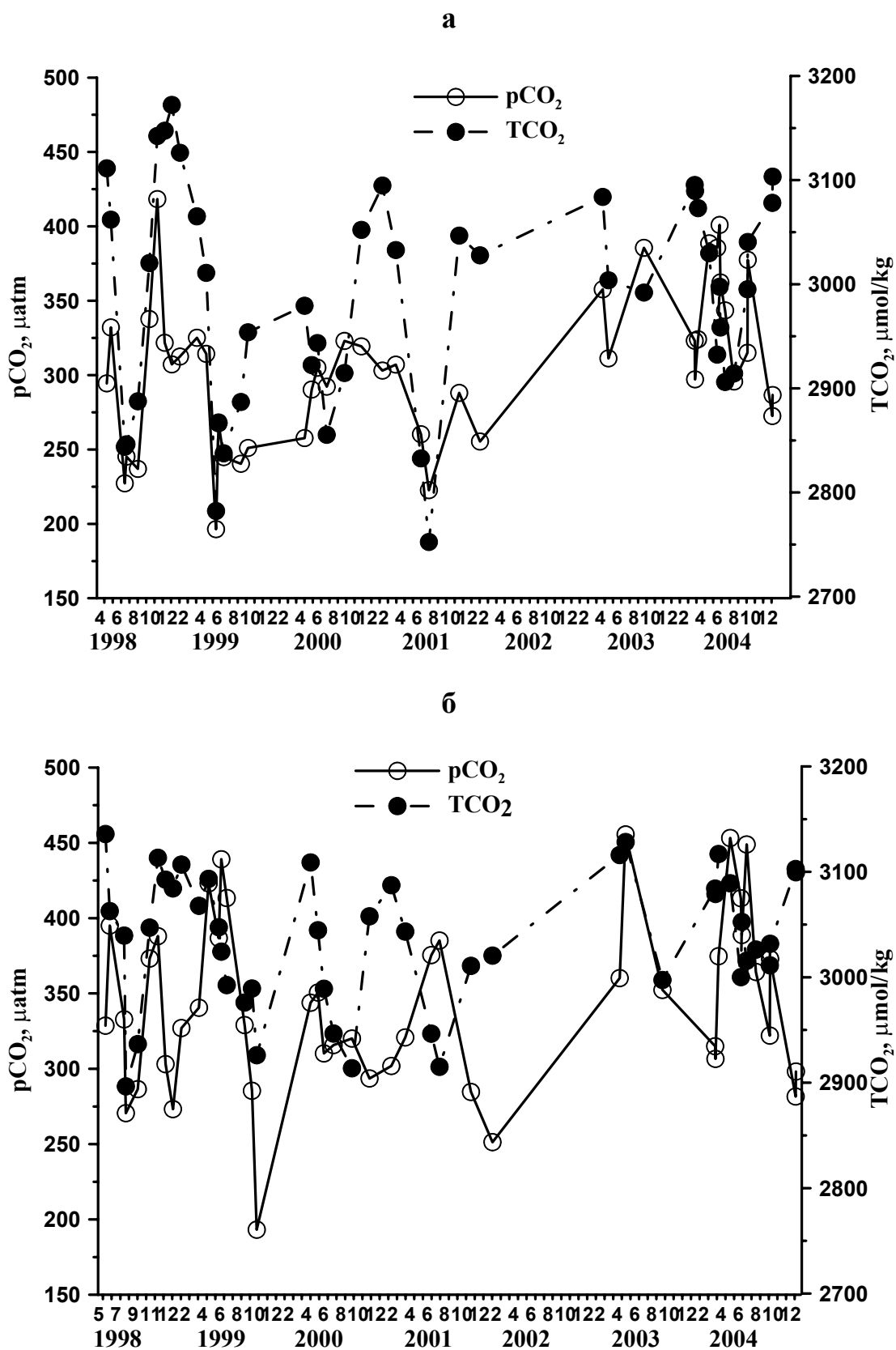


Рисунок 31. Сезонное изменение концентрации общего неорганического углерода и парциального давления CO_2 (а-поверхностный слой, б-придонный слой)

корреляции концентраций CO_3^{2-} с насыщением кислородом поверхностного слоя вод равен 0.75, в то время как в придонном слое корреляции не выявлено. За период наблюдения обнаружено снижение значений концентраций карбонатного иона, особенно в летний период. Например, в августе 1998 года концентрация карбонатного иона составляла 381 мкмоль/кг, а в августе 2004 – 261 мкмоль/кг (рис.30).

Общий растворенный неорганический углерод TCO_2 . Суммарное содержание растворенных форм CO_2 , HCO_3^- и CO_3^{2-} называют общим растворенным неорганическим углеродом:

$$\text{TCO}_2 = [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]. \quad (3)$$

Сезонный ход TCO_2 (рис.31) практически повторяет ход кривой сезонного изменения гидрокарбонатного иона (рис.30), который вносит основной вклад в суммарное содержание растворенных форм CO_2 . Как для поверхностного, так и для придонного слоев вод в осенне-зимний период регистрировался рост концентрации общего растворенного неорганического углерода с максимумом в январе-феврале месяцы, кроме того, были отмечены промежуточные максимумы в мае, как и для гидрокарбонатного иона. Наиболее высокое значение для поверхностного слоя было обнаружено в январе 1999 года (3172 мкмоль/кг) и в мае 1998 года (3136 мкмоль/кг) для придонного слоя вод. Минимальные концентрации были обнаружены в летние месяцы. Для поверхностного слоя наименьшее значение было зарегистрировано в июле 2001 г. (2752 мкмоль/кг), а для придонного – в июле 1998 г. (2897 мкмоль/кг). Поверхностный слой отличается большей изменчивостью концентраций TCO_2 по сравнению с придонным слоем. Средние значения концентраций TCO_2 для поверхностного и придонного слоев равны соответственно 2989 мкмоль/кг и 3037 мкмоль/кг, то есть, в целом по бухте характерно повышение концентраций TCO_2 от поверхностного слоя к придонному. Статистический анализ связей различных гидрохимических показателей выявил отрицательную корреляционную зависимость между концентрациями TCO_2 и кислорода в придонном слое ($r = -0,58$) в поверхностном слое. На рис. 32 представлено изменение величин TCO_2 с 1998 по 2005 год. Несмотря на существенные изменения средних значений TCO_2 в летний и зимний сезоны в течение всего периода наблюдения, среднегодовая концентрация TCO_2 в поверхностном слое не претерпела никаких ощутимых изменений (рис. 32а). Что касается придонного слоя (рис. 32б), то за период наблюдения был отмечен рост значений TCO_2 в летний период. Однако к значительному повышению среднегодовых значений это не привело.

Парциальное давление $p\text{CO}_2$. Изучению динамики парциального давления углекислого газа по сравнению с остальными компонентами карбонатной системы справедливо

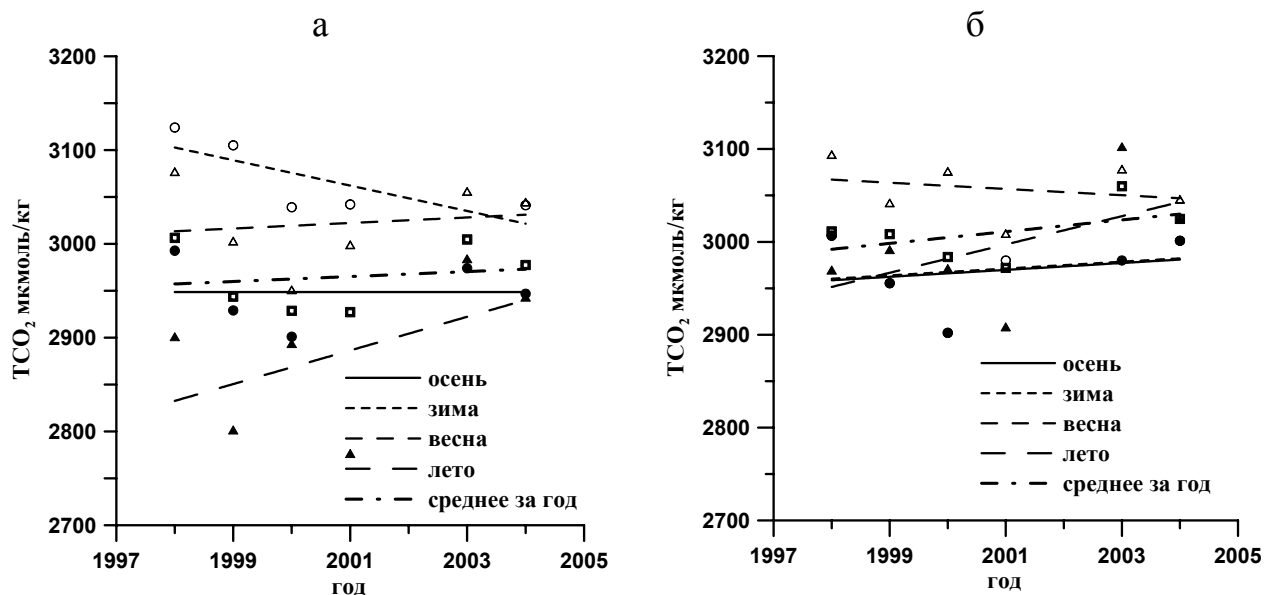


Рисунок 32. Временные изменения TCO_2 в поверхностном слое вод Севастопольской бухты в различные сезоны (1998-2005гг.): а – в поверхностном слое вод; б – в придонном слое вод (заштрихованный кружок – осень, не заштрихованный кружок – зима, не заштрихованный треугольник – весна, заштрихованный треугольник – лето, прямоугольник – среднегодовое значение).

уделяется наибольшее внимание исследователей, так как ее анализ позволяет оценивать потоки CO_2 между атмосферой и водой, их направленность и интенсивность. Сезонный ход кривых pCO_2 (рис.31) для поверхностного и придонного слоев вод отражает различие процессов образования и потребления CO_2 в этих слоях. Для поверхностного слоя вод максимальные значения парциального давления приходятся на зимние месяцы. Самое высокое значение было зарегистрировано в ноябре 1998 года (418 мкатм). В летний период происходит снижение парциального давления CO_2 . Минимальные значения приходятся на июнь – июль. Самое низкое значение было зарегистрировано в июне 1999 года (196 мкатм). Если предположить, что парциальное давление углекислого газа в атмосфере постоянно и составляет в период наблюдения 370 мкатм [47-50], то превышение равновесного содержания в поверхностном слое вод бухты создает условия для выделения диоксида углерода в атмосферу (эвазия). За период наблюдения значение pCO_2 выше атмосферного было зарегистрировано несколько раз: в декабре 1998 (418 мкатм), в октябре 2003 (386 мкатм), в июне (389 мкатм), в июле (401 мкатм) и октябре (375 мкатм) 2004 года. Обращает на себя внимание тот факт, что в 2004 году такая ситуация была зарегистрирована в летние месяцы, что свидетельствует о более интенсивном продуцировании диоксида углерода, чем его потреблению на

фотосинтетическую деятельность. Среднее значение $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое вод за весь период наблюдений составило 305 мкатм. Для придонного слоя был отмечен противоположный, чем для поверхностного слоя сезонный ход: максимальные значения $p\text{CO}_2$ были зарегистрированы в летние месяцы, а минимальные в зимние месяцы. Максимальная величина $p\text{CO}_2$ для придонного слоя было зарегистрировано в июне 2003 г (455 мкатм), а минимальная – в ноябре 1999 г. (193 мкатм). Среднее значение парциального значения двуокиси углерода составило 343 мкатм. Продолжительность периода, когда в придонном слое значения $p\text{CO}_2$ превышали атмосферное, колебалось от 3 до 5 месяцев в году. Следует также отметить, что максимум значений $p\text{CO}_2$ как для поверхностного так и для придонного слоев, тем выше, чем меньше был по абсолютной величине предшествовавший ему минимум. Наиболее значительные отличия величин $p\text{CO}_2$ между придонным и поверхностным слоями вод Севастопольской бухты наблюдались в теплый период года. В поверхностном слое фотосинтетическая деятельность приводит к потреблению CO_2 и уменьшает концентрацию оксида углерода в водах бухты. Повышенные значения $p\text{CO}_2$ в придонном слое является результатом окисления органического вещества, как продуцированного в поверхностном слое вод бухты, так и поступающего в бухту с коммунальными и ливневыми стоками.

Средние значения $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое вод Севастопольской бухты для всех сезонов, кроме зимнего, проявили тенденцию роста (рис. 33а) с 1998 по 2005 год. Среднегодовое значение $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое от выросло на 50 мкатм за время наблюдения. Придонный слой вод также продемонстрировал рост $p\text{CO}_2$ как в среднем за год, так и для большинства сезонов (рис. 33б).

Характер временных изменений TCO_2 и $p\text{CO}_2$ (рис. 31, 32) свидетельствует о том, что за время наблюдения произошел значительный рост содержания растворенной двуокиси углерода, при незначительных изменениях концентрации общего растворенного неорганического углерода. Наиболее значительные изменения приходятся на летний период, что согласуется с выводами П.Н. Маккавеева, сделанными для прибрежной зоны высокоширотных морей северного полушария [54].

Пространственное распределение $p\text{CO}_2$ в июле 2000 и 2001 гг. (рис.34). демонстрирует распространение зон повышенного парциального давления диоксида углерода по площади бухты в поверхностном и придонном слоях. В июле 2000 г. появление зон повышенного парциального давления CO_2 в поверхностном слое носило локальный характер и совпадало с местами ливневых стоков и источниками пресных вод. В придонном слое зона повышенного парциального давления CO_2 занимала Южную бухту, находящуюся под наибольшим антропогенным влиянием. В июле 2004 г.

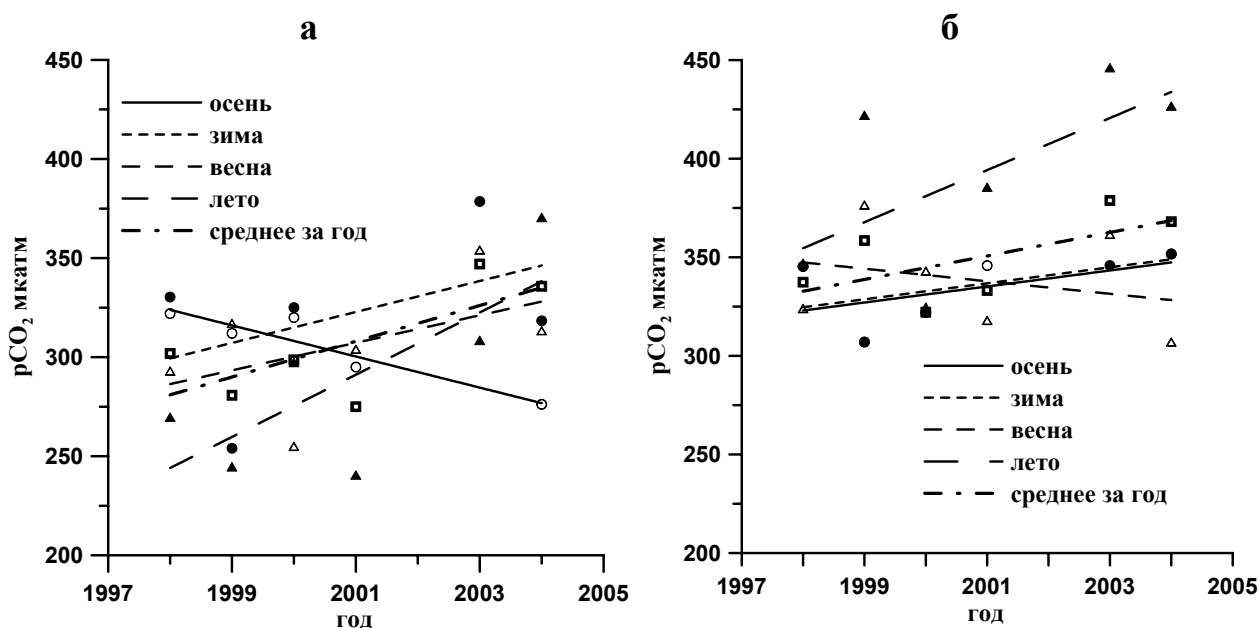


Рис.33 Временные изменения $p\text{CO}_2$ Севастопольской бухты в различные сезоны (1998-2005гг.): а – в поверхностном слое вод; б – в придонном слое вод (заштрихованный кружок – осень, не заштрихованный кружок – зима, не заштрихованный треугольник – весна, заштрихованный треугольник – лето, прямоугольник – среднегодовое значение).

поверхностный слой вод продемонстрировал значения $p\text{CO}_2$ выше атмосферного практически на половине акватории бухты, а придонный слой – на всей ее площади.

Для количественной оценки интенсивности газового обмена через поверхность раздела вода-атмосфера использовалось полуэмпирическое уравнение, предложенное Ю.И. Ляхиным [55, 56]. В таблице 2 представлены средние значения потоков CO_2 в различные сезоны в 2001 и 2004 годах. Положительные значения величины потока CO_2 говорят о том, что во все сезоны бухта в основном поглощает CO_2 , то есть находится в состоянии инвазии.

Таблица 2

Средний поток CO_2 в различные сезоны

Сезон	Средний поток, 2001 г. (моль $\text{CO}_2/\text{м}^2$ сутки)	Средний поток, 2004/05 гг. (моль $\text{CO}_2/\text{м}^2$ сутки)
Зима	11.8	21.0*
Весна	6.7	4.6
Лето	9.2	0.2
Осень	5.0	1.9
За год	8.2	6.9

* По данным измерений в январе 2005 года.

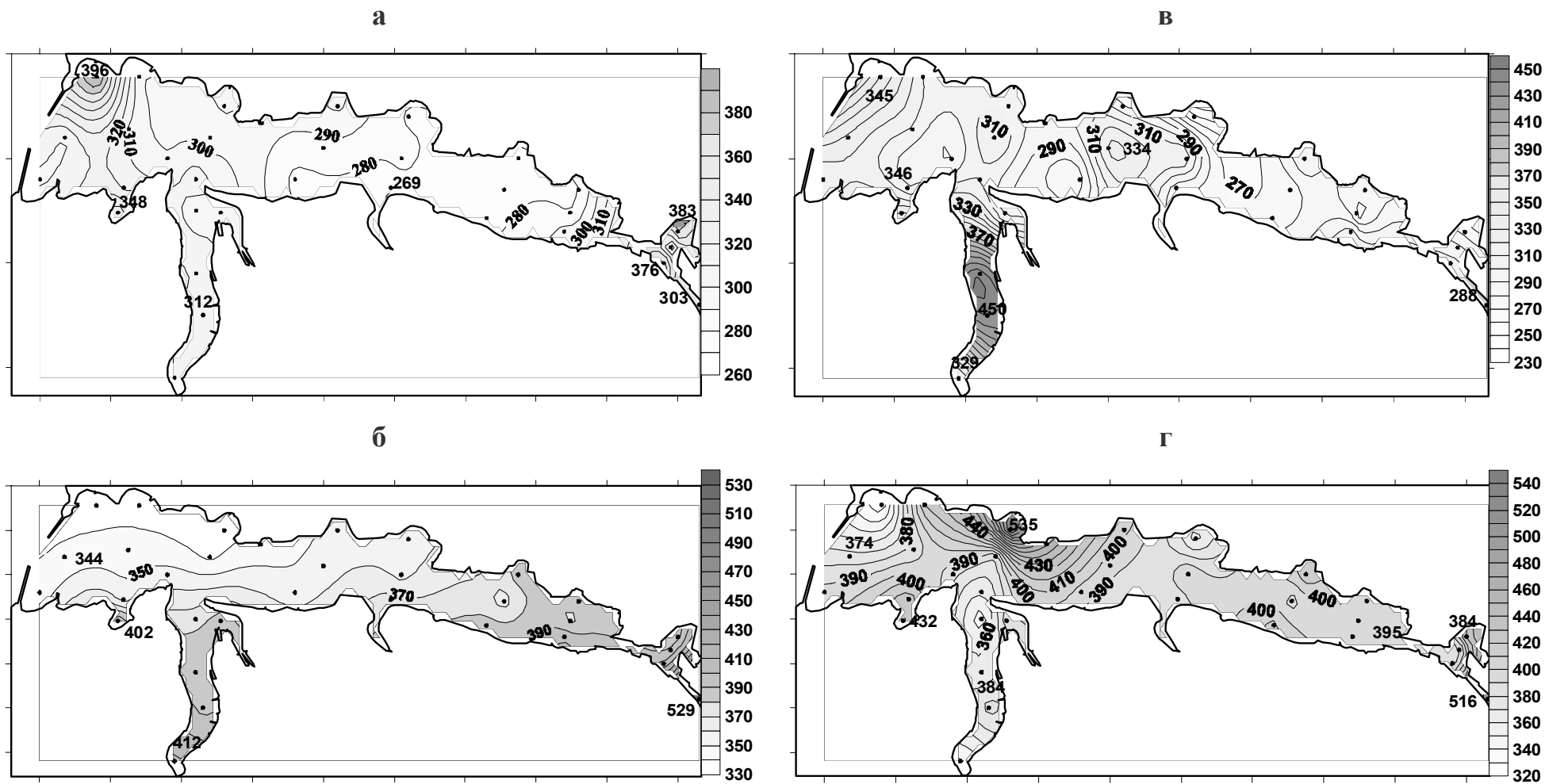


Рис. 34 Распределение $p\text{CO}_2$ (μatm) в поверхностном (а, б) и придонном (в, г) слоях (а, в - июль 2000, б, г-2004 июля).

Величина потока CO_2 в зимние месяцы была выше, чем в летние. Этот процесс определялся близкими к летним значениями разницы ($\Delta p\text{CO}_2$) в системе «вода-атмосфера» и значительным увеличением скорости ветра в зимний период над акваторией бухты. В остальные сезоны в 2001 году величина потока изменялась закономерно: высокая интенсивность поглощения углекислого газа водами бухты была приурочена к вегетационному весенне-летнему периоду, а затем снижалась в осенний период. В 2004 г. интенсивность поглощения углекислого газа из атмосферы понизилась для всех сезонов, кроме зимнего. Особенно заметно, в 46 раз, снизилась величина потока CO_2 из атмосферы в летний периода, в котором он должен быть максимальным, поскольку растворенный в воде CO_2 активно расходуется на фотосинтетическую деятельность в это время года.

Почти в 3 раза снизилась интенсивность поглощения водами бухты углекислого газа осенью и в полтора раза – весной. Такое заметное изменение сезонной динамики говорит об ощутимом для состояния карбонатной системы антропогенном воздействии. Можно отметить, что среднегодовое значение потока CO_2 в 2004 г. несколько уменьшилось, но осталось положительным. Следовательно, несмотря на то, что при почти неизменном уровне концентрации общего растворенного неорганического углерода, значение $p\text{CO}_2$ в водах бухты возросло, бухта продолжала поглощать CO_2 из атмосферы. На основании этого можно предположить, что растворенный CO_2 в Севастопольской бухте расходуется на синтез органического вещества. При этом предполагается, что и биогенные элементы поступают в бухту в достаточном для образования органического вещества количестве.

Для определения районов эвазии и инвазии в Севастопольской бухте были построены карты интенсивности обмена CO_2 между поверхностными водами бухты и атмосферой (рис. 35). Поскольку наиболее существенные изменения компонентов карбонатной системы были отмечены в летний период, то для иллюстрации изменения потоков CO_2 между поверхностным слоем вод Севастопольской бухты и атмосферой были выбраны карты распределения потоков CO_2 в июле 2001 г. и июле 2004 г. Как видно из рис. 35а, в 2001 г. бухта в основном поглощала CO_2 из атмосферы. На большей части бухты величина потока CO_2 составляла $15\text{--}17 \text{ мольCO}_2/\text{м}^2\text{сутки}$. Наблюдаемый район эвазии ($-2 \text{ мольCO}_2/\text{м}^2\text{сутки}$) – это район реки Черная с пресными водами, для которых характерны повышенные значения $p\text{CO}_2$. Было также отмечено понижение потока CO_2 в воды Южной бухты ($13,2 \text{ мольCO}_2/\text{м}^2\text{сутки}$) и в район Инкермана ($10,7 \text{ мольCO}_2/\text{м}^2\text{сутки}$), находящихся под влиянием сточных и распресненных вод. В 2004 г. практически половина площади бухты находилась в состоянии эвазии (рис. 35б), интенсивность потока менялась в пределах от $1,8$ до $0 \text{ мольCO}_2/\text{м}^2\text{сутки}$. Минимальное значение было отмечено в районе реки Черной и составило $-9,1 \text{ мольCO}_2/\text{м}^2\text{сутки}$. В той части бухты, где

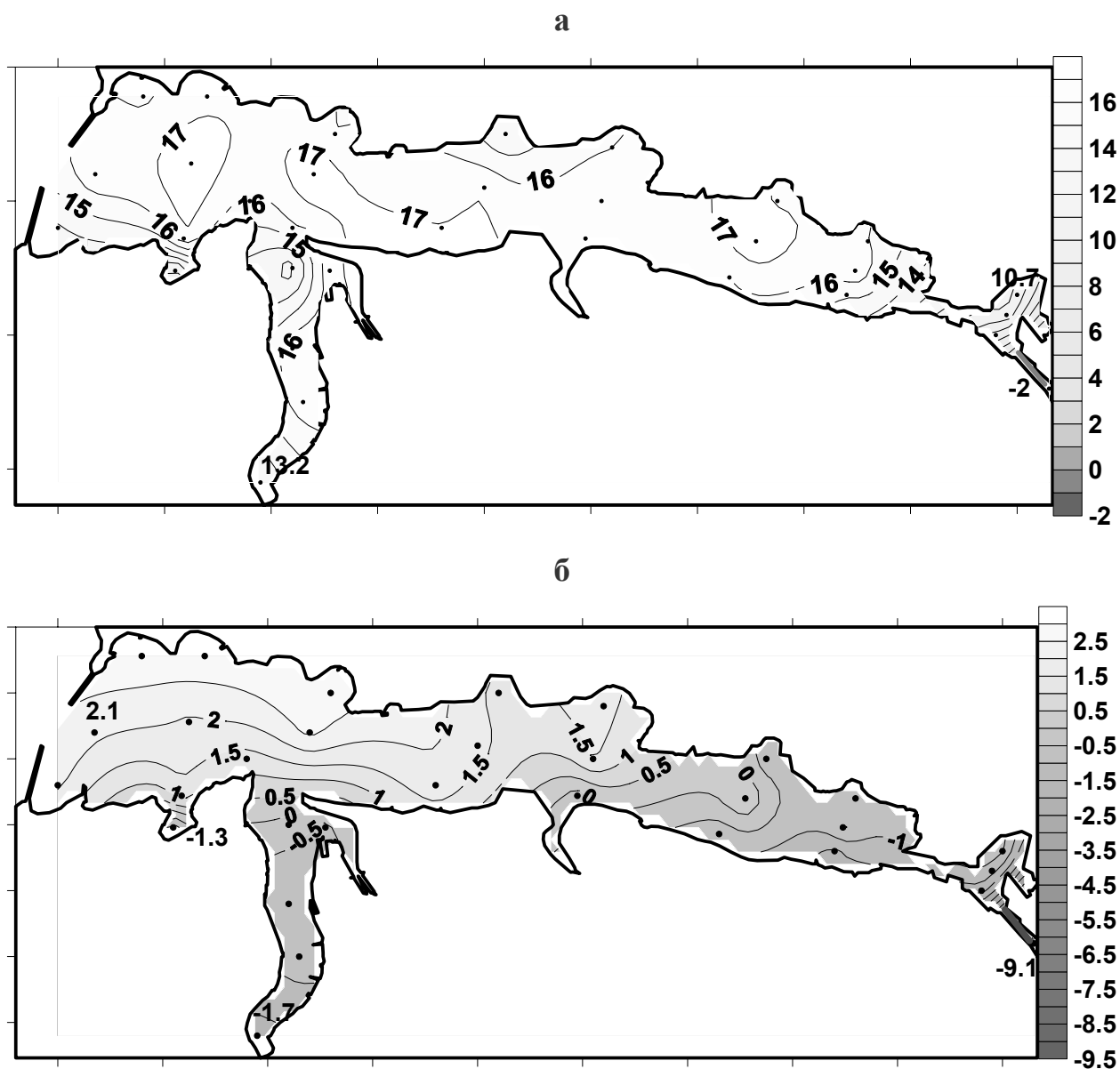


Рис. 35 Пространственное распределение потока CO₂ на границе «вода-атмосфера» в Севастопольской бухте ((+)- поглощение CO₂, (-) – выделение CO₂), а - 2001 г., б – 2004 г.

определялся процесс инвазии, интенсивность потока CO₂ направленного из атмосферы в воды бухты снизилась с 17 до 2 мольCO₂/м²сутки.

Особенности гидролого-гидрохимической структуры вод бухты в условиях летней стагнации

Изучение гидролого-гидрохимического режима Севастопольской бухты по средним многолетним данным помогает выявить общие закономерности, присущие данной

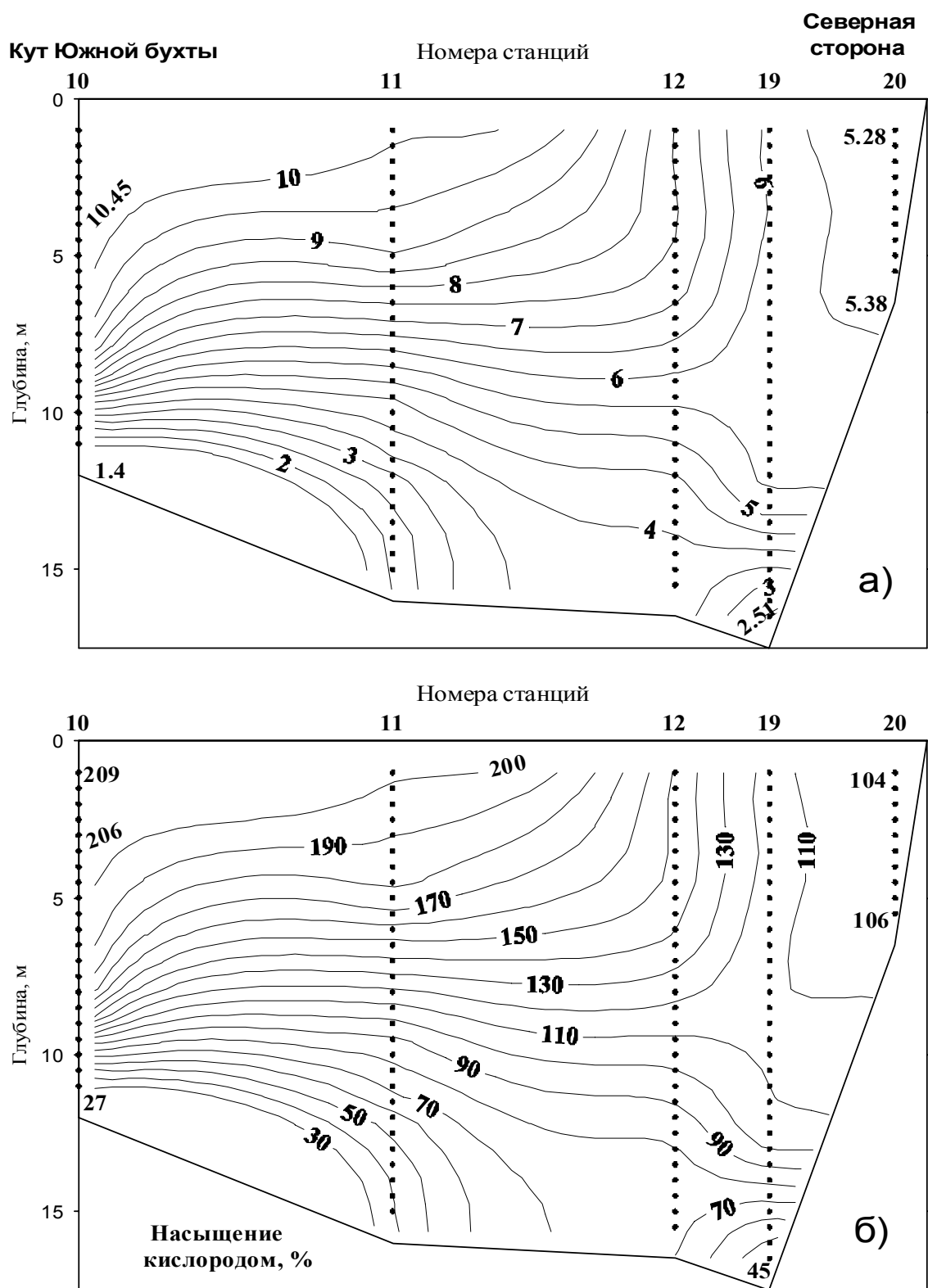


Рисунок 36. Вертикальная структура поля кислорода, мл/л (а) и насыщения воды кислородом, % (б) на разрезе от вершины Южной бухты до Северной стороны.

акватории. Однако в условиях значительной антропогенной нагрузки осредненные по акватории параметры мало информативны из-за пространственной неоднородности

содержания ЗВ и дискретности источников загрязнения. В характерных для бухты условиях значительной синоптической изменчивости более продуктивным подходом для познания особенностей распределения термогалинных и гидрохимических характеристик является рассмотрение конкретных ситуаций. При этом рассмотрение экстремальных ситуаций позволяет определить основные факторы, приводящие к негативным последствиям, и оценить возможности снижения их воздействия. Рассмотрим пример ситуации возникновения резкой гипоксии в бухте Южной в период летней стагнации. Для оценки условий развития процесса гипоксии в июле 1999 г. было выполнено три последовательных съёмки – 1-го, 9-го и 28-го июля. Результаты представлены в табл. 3 и на рис. 36.

В предшествующие рассматриваемому периоду два месяца (май-июнь 1999 г.) над исследуемой акваторией преобладали ветры восточных и северо-восточных направлений (8-12 м/с). При этом в Южную бухту из Севастопольской бухты были вынесены распресненные (средняя соленость 17,5) воды с повышенным содержанием биогенных веществ. В июле при ослаблении ветровой деятельности (среднемесячные значения скорости ветра 2-3 м/с), замедленном водообмене (стабильном уровне воды в бухте) и под влиянием высокой (около 26°C) температуры и пониженной солёности (17,33) сформировался высокоградиентный слой с устойчивой вертикальной стратификацией вод. Поверхностная вода имела чрезвычайно высокое содержание кислорода – более 15 мл/л (>200% нас.), аномально высокое значение водородного показателя (pH=8,91) и общей щёлочности и низкую прозрачность (1,5 м по диску Секки). Присутствие в поверхностной воде высоких концентраций аммония свидетельствует о том, что источником биогенных элементов являются сточные воды. С течением времени устойчивость вод нарастала. Если 1 июля разница в плотности между поверхностным и придонным слоями составляла 1,2 ед. условной плотности, то 9 июля эта разница была равна 2,8 ед.

Такие гидролого-гидрохимические показатели провоцируют массовое развитие фитопланктона в евтрофированных водоемах. При этом избыток продуцируемого взвешенного ОВ, а также ОВ сточных вод поступает в придонные слои, где происходит его окисление. Анализ характера вертикального распределения кислорода по результатам непрерывного зондирования при измерении кислорода «in situ» (рис. 36), а также данные табл. 3, указывают на то, что затраты кислорода на окисление ОВ в придонном слое весьма значительны.

Совокупность ряда гидрологических и гидрохимических факторов (высокая вертикальная устойчивость вод, повышенное содержание биогенных элементов, избыточное содержание взвешенных органических веществ и др.) привела к резкому

Таблица 3.

Гидролого-гидрохимическая структура вод Севастопольской бухты и сопредельного района открытого моря в июле 1999 г.

Дата	Горизонт	Темпера- тура °С	Соле- ность	Кислород		рН, ед. рН	Щелочность, мг- экв/л	Биогенные элементы, мкМ					Прозрач- ность, м
				мл/л	насыщение, %			Фосфа- ты	Крем- ний	Нитра- ты	Нитри- ты	Аммо- ний	
Южная бухта, ст. 6													
1 июля	поверхность	25,79	17,33	15,16	294	8,91	3,350	0,27	0,5	7,8	0,43	0,20	1,5
	придонный	22,46	17,76	3,51	64	8,25	3,346	0,64	7,4	4,1	0,31	5,84	
9 июля	поверхность	27,15	16,99	10,90	216	8,62	3,390	0,09	4,4	13	0,50	х	2,0
	придонный	20,66	18,32	3,37	60	8,17	3,334	0,49	7,8	3,1	0,22	5,03	
28 июля	поверхность	27,79	17,18	10,43	209	8,72	3,306	0,07	3,1	22	0,60	0,48	2,0
	придонный	25,74	17,67	1,40	27	8,17	3,349	0,15	7,1	2,4	0,61	х	
Севастопольская бухта, ст. 5													
1 июля	поверхность	26,25	17,53	6,67	131	8,42	3,287	0,12	0,8	0,10	0,01	0,27	3,0
	придонный	15,22	18,27	6,04	96	8,39	3,299	0,07	5,2	0,28	0,05	0,34	
9 июля	поверхность	25,59	17,65	7,75	150	8,37	3,283	0,05	1,3	0,09	0,02	0,09	6,0
	придонный	22,00	17,94	6,12	111	8,33	3,291	0,06	4,1	0,20	0,00	0,21	
28 июля	поверхность	27,14	17,68	7,43	148	8,53	3,302	0,03	1,3	0,08	0,06	0,40	7,5
	придонный	23,58	17,85	3,89	79	8,27	3,298	0,04	7,9	0,13	0,13	х	
Прибрежная зона (траверз бухты Омега)													
1 июля	поверхность	24,62	17,86	5,62	107	8,37	3,307	0,12	3,3	3,76	0,01	х	9,0
	придонный	9,59	18,20	6,47	91	8,37	3,307	0,05	4,8	0,41	0,13	х	
9 июля	поверхность	24,79	17,88	5,84	108	8,35	3,326	0,03	3,5	3,61	0,05	х	10,0

Примечание: х – не определяли

снижению растворенного кислорода в придонном слое и возникновению гипоксии. Последующая гидролого-гидрохимическая съёмка, выполненная 28 июля 1999 г., подтвердила отмеченную тенденцию формирования в Южной бухте неблагоприятной экологической ситуации вплоть до образования зон гипоксии. Так, если в придонном слое относительное содержание кислорода (в процентах насыщения) 1 июля составляло 64%, 9 июля – <60%, то 28 июля оставалось всего лишь 27% (табл.3, рис 36). При этом зона гипоксии не имела локального характера, обусловленного поступлением загрязняющих веществ из точечных источников (вершина Севастопольской бухты, кутовая часть Южной бухты). Как было показано в работе [7], эта зона ($\leq 50\%$ насыщения) охватывала обширную часть акватории Севастопольской бухты – от вершины (ст.1) до середины бухты (ст.5). Эти особенности гидролого-гидрохимической структуры вод четко просматриваются и на разрезе от кутовой части Южной бухты до Северной бухты.

Выводы. Анализ результатов выполненных в 1998-2005 гг. гидрохимических наблюдений показали, что вследствие изменения основных режимобразующих факторов – речного стока, водообмена с сопредельной частью моря, а также постоянного загрязнения акватории сточными и ливневыми водами, экологическому состоянию Севастопольской бухты в современных условиях присущи определенные негативные изменения. В части, касающейся гидрохимического режима, эти негативные изменения проявляются в виде:

- изменения естественного режима растворенного кислорода. В условиях евтрофикации нарушается сезонный характер распределения кислорода: летом (июль-август), в период стагнации, концентрация кислорода в придонных слоях вод становится ниже рекомендуемой для рыбохозяйственных водоемов нормы ($\leq 4,2$ мл/л) и, таким образом, ведет к развитию процессов гипоксии;
- накопления в воде биогенных элементов до концентраций, которые превышают характерные для открытых вод уровни на порядок; летом в придонных слоях отмечены концентрации нитритов, превышающие ПДК;
- повышенных значений общей взвеси, pH, общей щелочности;
- уменьшения прозрачности морской воды;
- перестройки внутриводоемных процессов, что выражается в появлении резких экстремумов гидрохимических параметров между поверхностными и придонными слоями вод, накоплении биогенных веществ и изменении направленности окислительно-восстановительных процессов в придонном слое.

Сезонная изменчивость компонентов карбонатной системы поверхностного слоя вод Севастопольской бухты за период 1998-2000 гг. соответствовала сезонной изменчивости

незагрязненных акваторий. К 2003 году сезонная изменчивость перестала быть ярко выраженной. В придонном слое эта тенденция была еще более очевидной. Парциальное давление CO_2 вод Севастопольской бухты повысилось в течение наблюдаемого периода, как в поверхностном, так и в придонном слоях. Отмечена тенденция к росту pCO_2 в водах бухты при условии сохранения уровня антропогенной нагрузки на бухту на современном уровне (в течение последнего десятилетия).

В летний период наблюдалось заметное увеличение содержания растворенного диоксида углерода в водах бухты. Это приводит к тому, что процессы окисления органического вещества, как поступившего в бухту из внешних источников, так и продуцированного в водах бухты, способствуют образованию значительно большего количества CO_2 , чем его потребляется в процессе фотосинтеза.

Биогеохимическое районирование морской поверхности

Анализ гидрохимической структуры вод Севастопольской бухты показывает, что прямое или косвенное антропогенное влияние на качество морских вод проявляется в поле таких показателей как кислород, фосфаты, кремний, нитраты, нитриты, ионы аммония, взвешенное вещество.

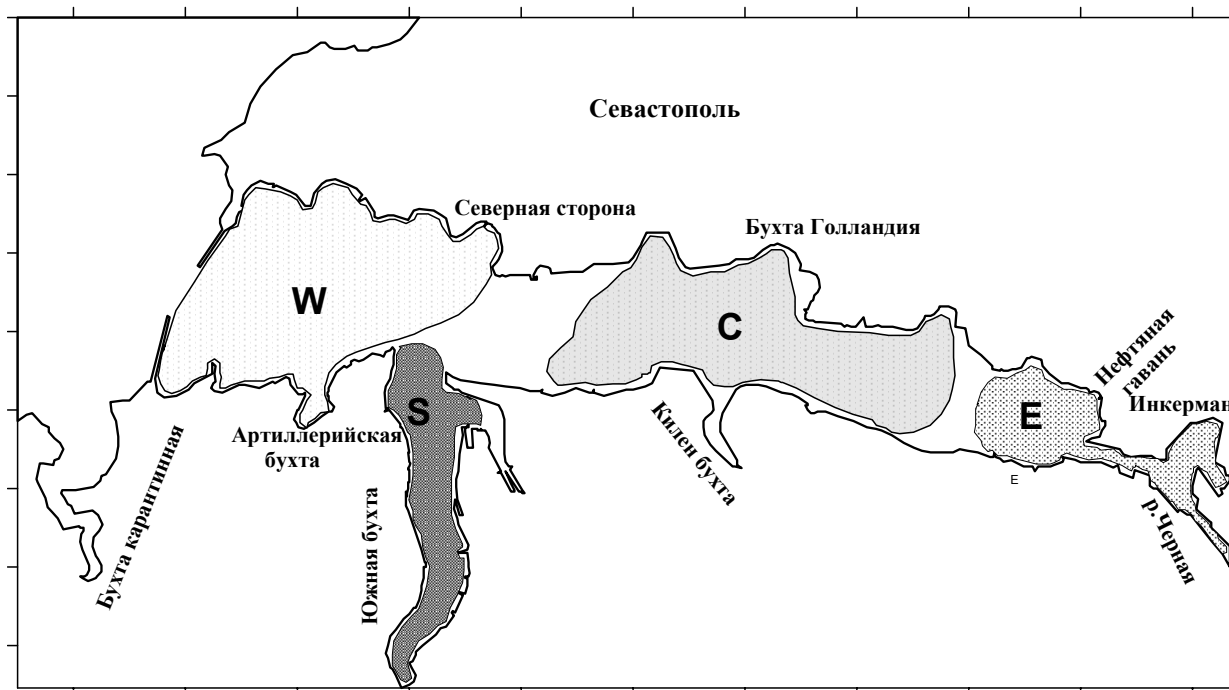


Рисунок 37. Расположение районов слабого (W, западный район), умеренного (E, восточный район) сильного (C, центральный район) и очень сильного (S, южный район) загрязнения Севастопольской бухты.

По картам распределения фосфатов, силикатов, нитратов, нитритов, ионов аммония и количества взвешенного вещества в поверхностном слое, построенным по данным исследований бухты в период с 1998 по 2000 гг., были выделены районы слабого, умеренного и сильного и очень сильного загрязнения (рис. 37).

Географически в зону слабого загрязнения входят западная (зона W на рисунке) и умеренного - восточная (E) части бухты. Зона сильного загрязнения занимает центральную часть бухты (C). Очень сильным загрязнением отличается практически вся Южная бухта (зона S на рисунке). Дискриминантный функциональный анализ перечисленных выше параметров (выполнен В.П. Парчевским, ИнБИОМ НАНУ) позволил обнаружить значимые различия между выделенными районами, особенно в летний и весенний периоды года. Зимой только Южный район показывал значимое отличие от неразличимых между собой остальных районов. Осенью различие между восточным и центральным районами сохранялось, тогда как южный и западный районы имели близкие характеристики.

Заключение

Рассмотрены результаты анализа данных гидролого-гидрохимических исследований, выполненных в 1998-2005 гг. в рамках экологического мониторинга Севастопольской бухты и отмечена значительная изменчивость гидрохимической обстановки, которая обусловлена гидрометеорологическими факторами и антропогенным влиянием. Обобщение гидролого-гидрохимических материалов, полученных на основе междисциплинарных исследований при выполнении экологического мониторинга, позволило установить особенности распределения термогалинных и гидрохимических характеристик в пространстве и во времени, оценить роль абиотических факторов в жизнедеятельности некоторых планктонных организмов и получить сведения о том, как реагируют гидробионты на антропогенное воздействие.

Существующий гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты является естественным фоном функционирования экосистемы морской акватории, который сформировался в результате природных климатических изменений и длительного антропогенного воздействия. Важнейшими факторами, оказавшими влияние на изменение гидролого-гидрохимического режима и экологическое состояние, являются:

- зарегулирование речного стока и использование его существенной части для водопользования;

- нарушение водообмена бухты с сопредельной морской частью из-за уменьшения входного пространства при постройке заградительной дамбы;
- использование акватории бухты для разгрузки муниципальных и промышленных сточных вод и ливневого стока;
- использование бухты как портовой акватории и зоны рекреации при недостаточной защите от загрязнений.

Систематическое изучение вод бухты совместно с факторами влияния на гидролого-гидрохимический режим позволило установить ряд закономерностей, основные из которых сформулированы ниже.

Характер водообмена Севастопольской бухты, который связан с речным стоком и изменениями водного баланса Черного моря, является важным фактором экологического состояния бухты. Значительное поступление в бухту речных вод при высоком речном стоке и искусственном сбросе вод из Чернореченского водохранилища вызывает заметное распреснение верхнего слоя вод бухты и ограничивает приток более чистых морских вод. Минимальные объёмы стока зарегулированной водохранилищем реки Черной, наоборот, способствуют усилению адвекции морских вод в бухту. Эти явления оказывают важное влияние на формирование гидролого-гидрохимической структуры.

На распределение гидролого-гидрохимических характеристик и изменение экологических условий в бухте значительно влияет интенсивность водообмена, динамика вод в бухтах и стгонно-нагонные ветры. Наиболее неблагоприятная ситуация в Южной бухте складывается тогда, когда в периоды адвекции морских вод действуют ветры северных, северо-восточных и восточных направлений, которые, в свою очередь, способствуют очищению собственно Севастопольской бухты. Под влиянием сильных и продолжительных ветров южных направлений создается противоположная ситуация. А поскольку в среднем за год преобладают ветры северных и восточных направлений, экологические условия в Южной бухте остаются неблагоприятными в течение большей части года.

Морфометрические особенности, полузамкнутость Севастопольской бухты, искусственное сужение входного пролива способствуют при определенных ветровых условиях формированию вихревых динамических образований внутри бухты. Замкнутые циркуляционные ячейки локализуют линзы распресненных вод. Данные образования накапливают и переносят загрязняющие вещества, а также определяют особенности гидролого-гидрохимической и биологической структуры вод.

Определяющим фактором водообмена Севастопольской бухты являются колебания уровня Черного моря, связанные с общециркуляционными процессами и изменениями

водного баланса моря. Речной сток и сгонно-нагонные ветры могут лишь усиливать или ослаблять процессы поступления (адвекции) морских вод в бухту или стока вод из бухты, которые в первую очередь определяются сезонными изменениями уровня моря.

Установлено, что в исследуемой акватории сохраняется устойчивое изменение гидрохимических параметров морской воды, обусловленное антропогенным влиянием. Отсутствие действенных природоохранных мероприятий по сокращению поступлений загрязняющих веществ со сточными и речными водами приводит к тому, что повышенные концентрации биогенных веществ в воде превышают уровень концентраций в открытой части моря в 10-100 раз. Изменение естественного режима растворенного кислорода проявляется в понижении его содержания в поверхностном слое вод в позднеосенний и в первую половину зимнего периода (насыщение вод кислородом менее 100%). Это не характерно для чистых прибрежных и открытых вод. Максимальные концентрации растворенного кислорода в придонном слое наблюдаются поздней осенью в период интенсивного конвекционного и ветрового перемешивания. Кроме того, в период летней стагнации при избыточном содержании биогенных элементов и высокой температуре наблюдается массовое «цветение» фитопланктона, так называемый летний максимум, который характерен лишь для загрязненных акваторий. В результате, в поверхностном слое вод наблюдается перенасыщение кислородом (до $\geq 200\%$). Продуцируемое таким образом в поверхностных водах первичное органическое вещество лишь частично используется первичными консументами, а основная его доля оседает на дно. При этом в придонной области в условиях резкой устойчивой плотностной стратификации, когда аэрация глубинных слоев ниже пикноклина затруднена, и при избыточном поступлении на дно органического вещества наблюдаются явления гипоксии.

Сезонность изменений гидрологических и гидрохимических параметров проявляется как следствие климатических сезонных изменений, а также биологических процессов. На природные процессы изменчивости накладывается антропогенное влияние. Анализ основных источников загрязнения бухты указывает на весьма значительный антропогенный пресс, который бухта испытывает на протяжении последних двух столетий. Интенсивная евтрофикация бухты сопровождается интенсификацией окислительно-восстановительных процессов, увеличением содержания аммиачного, нитритного и нитратного азота, изменением режима распределения растворенного кислорода и его насыщенности, ростом парциального давления диоксида углерода. При этом влияние настолько значительно, что нарушается сезонный характер распределения кислорода.

Анализ межгодовых изменений растворенного кислорода в бухте показывает, что диапазон колебаний весьма значительный. Летом в период с 1998 по 2005 гг. средняя концентрация растворенного кислорода у дна варьировала от 1,4 до 7,9 мл/л. При этом процессы формирования зон гипоксии в придонном слое вод бухты в летний период и дефицита кислорода в осенне-зимний период наблюдаются ежегодно, хотя масштабы, выраженность и локализация этих явлений различаются. Обращает внимание практически полное совпадение хода межгодовых изменений содержания кислорода в июле и августе. В годы сильно выраженного дефицита кислорода его низкие концентрации наблюдались как в июле, так и августе, хотя при высокой концентрации весной дефицит кислорода был выражен значительно слабее. Можно утверждать, что создавшаяся ситуация является следствием долговременного антропогенного влияния при отсутствии достаточных мер по защите среды.

Направленность потока газовых составляющих (растворенный кислород, диоксид углерода) в морской среде определяется как физическими, так и биологическими процессами. Его тесная связь с циклом углерода определяется тем, насколько уравновешены процессы продукции и деструкции органического вещества в морской акватории. Отмеченный рост парциального давления диоксида углерода в бухте свидетельствует о том, что поступление с речным стоком, а также выделение CO_2 в процессе минерализации органического вещества не компенсируется уровнем его потребления при фотосинтезе. Это приводит к выводу о разбалансированности углеродного цикла, что является серьезным нарушением функционирования экосистемы Севастопольской бухты.

Рекомендации по неотложным мерам и дальнейшему выполнению экологического мониторинга.

Как было отмечено выше, для проведения экологического мониторинга морской среды Севастопольского региона в рамках задач региональной программы охраны окружающей среды [5], плановое финансирование не было открыто, и целый ряд насущных проблем остался нерешенным. По этой причине отсутствует согласованный план экологического мониторинга, который предусматривал бы единый подход и координацию действий при выполнении всех составляющих мониторинга: физического, химического и биологического.

В этой связи следует обозначить проблемы, которые подлежат первоочередному решению. Таковыми, на наш взгляд, являются:

1. продолжение мониторинга абиотических и биологических параметров морской среды совместно с Институтом биологии южных морей НАН Украины на

основе междисциплинарных исследований при синхронном выполнении наблюдений;

2. организация и проведение мониторинга источников загрязнения для установления фактического объема поступающих в бухту загрязняющих элементов:

а) речного стока (мониторинг в низовье реки Черной, на участке от п. Хмельницкое до устья);

б) ливневого стока с селитебной водосборной площади Севастопольской бухты;

в) сбор информации и создание базы данных по сбросу сточных вод в бухту и компонентов загрязнения (биогенные элементы, нефтяные углеводороды и пр.).

3. подготовка исходной информации для расчета баланса масс биогенных элементов (создание резервуарной модели).

Эти первоочередные научные задачи по совершенствованию и продолжению экологического мониторинга Севастопольской бухты могут быть решены при наличии соответствующего научно-технического и финансового обеспечения.

Литература

1. Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (черноморский сектор). Монография. ИнБЮМ НАН Украины. Ред. Еремеев В.Н. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – 511 с.
2. Миронов О.Г., Кирюхина Л.Н., Алёмов С.В. Санитарно-биологические аспекты экологии Севастопольских бухт в XX веке. – Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – 185 с.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР Т. IV. Черное море. Вып. 3. Современное состояние загрязнения вод Черного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1996. – 230 с.
4. Жунько Л.М., Иванов В.А., Ильин Ю.П., Овсяный Е.И., Романов А.С. Система экологического мониторинга морской среды Севастопольского региона: обоснование и организационная концепция. //Глобальная система наблюдений Черного моря: фундаментальные и прикладные аспекты. Севастополь, 2000.- с.109-118.
5. Комплексная программа охраны окружающей природной среды, рационального использования природных ресурсов и экологической безопасности г. Севастополя на период до 2010 г. Севастополь, 2003.- 317 с.
6. Павлова Е.В., Овсяный Е.И., Гордина А.Д., Романов А.С., Кемп Р.Б. Современное состояние и тенденции изменения экосистемы Севастопольской бухты. //Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу. Севастополь, Аквавита, 1999,с.70-94.
7. Овсяный Е.И., Кемп Р.Б., Репетин Л.Н., Романов А.С. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты в условиях антропогенного воздействия (по наблюдениям 1998-1999 гг.). //Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Сб. научн. тр. МГИ НАН Украины.- Севастополь, 2000, с.79-103.
8. A.D. Gordina, E.V. Pavlova, E. I. Ovsyany, J.G. Wilson, R. B. Kemp and A. S. Romanov. Long-term changes in Sevastopol Bay (the Black Sea) with particular reference to the ichthyoplankton and zooplankton. //Estuarine, Coastal and Shelf Sci., 2001, vol. 52, pp. 1-13.
9. Геворгиз Н.С., Кондратьев С.И., Ляшенко С.В., Овсяный Е.И., Романов А.С. Результаты мониторинга гидрохимической структуры Севастопольской бухты в теплый период года. //Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Сб. научн. тр. МГИ НАН Украины, вып. 2 (6), Севастополь, 2002, с. 139-156.
10. Гордина А.Д., Ткач А.В., Павлова Е.В., Климова Т.Н., Овсяный Е.И., Романов А.С., Репетин Л.Н. Состояние ихтиопланктонных сообществ в Севастопольской бухте (Крым) в мае-сентябре 1998 и 1999 гг. //Вопросы ихтиологии, 2003, т.43, №2, с.184-193.
11. Репетин Л.Н., Гордина А.Д., Павлова Е.В., Романов А.С., Овсяный Е.И. Влияние океанографических факторов на экологическое состояние Севастопольской бухты (Черное море). //Морской гидрофизический журнал, 2003, №2, с.66-80.
12. Гордина А.Д., Цыцугина В.Г., Овсяный Е.И., Романов А.С., Кемп Р.Б. Состояние икры пелагических рыб в прибрежных водах Черного моря у г.Севастополя. //Гидробиологический журнал, 2004, т. 40, №1, с.43-55.
13. Игнатьева О.Г., Романов А.С., Овсяный Е.И., Коновалов С.К. Сезонная динамика компонентов карбонатной системы в Севастопольской бухте (1998-2000 гг.). //Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Сб. научн. тр. МГИ НАН Украины, вып.10 - Севастополь, 2004, с.130-140.
14. Овсяный Е.И., Романов А.С., Миньковская Р.Я. и др. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона. //Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Сб. научн. тр. МГИ НАН Украины, вып.2 - Севастополь, 2001, с.138-152.

15. Лоция Черного и Азовского морей. – Николаев: Русская лито-типография, 1892.- 487 с.
16. *Зернов С.А.* К вопросу об изучении жизни Черного моря. //Записки Императ. акад. наук, сер. 8, 1913, т. 32, №1.- 293 с.
17. *Добржанская М.А.* О распределении кремния в Черном море. //Тр. Севаст. биол. станции АН СССР, 1948, т. 6, с. 372-377.
18. *Добржанская М.А.* О нитратах в Черном море. //Докл. АН СССР, 1954, т.99, №1, с.61-64.
19. *Добржанская М.А.* Основные черты распределения и динамики фосфатов в Черном море. //Тр. Севастоп. биостанции АН СССР, 1958, т. 10, с. 195-277.
20. *Добржанская М.А.* Основные черты гидрохимического режима Черного моря. //Тр. Севастоп. биостанции, 1960, т. 13, с. 325-378.
21. *Добржанская М.А.* Биохимическое потребление кислорода (БПК₅) по данным многолетних ежемесячных наблюдений на суточных станциях. //Процессы перемешивания и водообмена в море и их влияние на биологическую продуктивность. Биология моря, вып. 27. К.: Наукова думка, 1972. с.132-138.
22. *Яковенко В.А.* Загрязнение морской воды у берегов г. Севастополя и предупредительные мероприятия. //Военно-морской врач, 1945, т.VI, №4, с.
23. *Яковенко В.А.* Морские течения и санитарная охрана морских берегов приморских берегов. //Гигиена и санитария, 1954, №8, с.11-15.
24. *Алфимов Н.Н.* Экспериментальные основы гигиены прибрежной полосы моря. Автореф. дисс. Л.: 1951. – 21 с.
25. *Алфимов Н.Н.* О санитарно-биологических показателях загрязнения морских вод. //Санитарная охрана прибрежной полосы моря. – К.: Госмедиздат УССР, 1959. с.
26. *Ермакова Л.Ф., Величкевич А.К.* Загрязнение морских вод в бухтах, имеющих затрудненный водообмен с морем, на юго-западном побережье Крыма. //Сб. работ бассейновой гидрометеорологической обсерватории Черного и Азовского морей. Вып. 6. - Л.: Гидрометеиздат, 1968, с.16-28.
27. *Горбенко Ю.А.* Экология морских организмов перифитона. – К.: Наукова думка, 1977. -252 с.
28. *Морочковский В.А., Ковальчук Ю.Л.* Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты. //Ихтиофауна черноморских бухт в условиях антропогенного воздействия. – К.: Наукова думка, 1993.- С.17-24.
29. *Хоролич Н.Г.* Расчет водообмена мелководного залива (бухты) с морем. //Тр. ГОИН, 1986, вып. 168, с.113-118.
30. *Иванов В.А., Михайлова Э.Н., Репетин Л.Н., Шапиро Н.Б.* Модель Севастопольской бухты. Воспроизведение вертикальной структуры полей температуры и солености в 1997-1999 гг. //Морской гидрофизический журнал, 2003, №4, с.15-35.
31. *Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б.* Моделирование циркуляции и пространственной структуры термогалинных полей в Севастопольской бухте с учетом реальных внешних данных (зима 1997г.) //Морской гидрофизический журнал, 2005, №2, с.60-76.
32. *Protocols for the joint global ocean study (JGOFS) core measurements.* IOC, Manual and guides, №29. UNESCO, 1994.- 170 p.
33. Современные методы гидрохимических исследований океана. – М.: Изд. ИОАН СССР, 1992. -С.199
34. *Unesco technical papers in marine science, No.51, Thermodynamic of the carbon dioxide system in seawater,* Unesco 1987, pp. 3-21.
35. *Millero F.J.* Chemical oceanography. Second Edition. – CRC Press, 1996 469 p.
36. *Овсяный Е.И., Забурдаев В.И., Романов А.С.* О применении единиц измерения количества и состава вещества в океанологии. //Морской гидрофизический журнал, 2004, №4, с.61-71.

37. *Тимченко З.В.* Водные ресурсы и экологическое состояние малых рек Крыма. – Симферополь, ДОЛЯ, 2002. – 152 с.
38. *Шадрин Н.В., Лялина М.Ю.* Пластиковый мусор в море и на берегу. //Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу. Севастополь, Аквавита, 1999, с.70-94.
39. *Шапиро Н.Б., Ющенко С.А.* Моделирование ветровых течений в Севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. – 1999. – № 1. – С.42-56.
40. *Берсенева Г.П., Геворгиз Н.С.* Изменчивость концентрации хлорофилла и феофитина в фитопланктоне Севастопольской бухты за период 2000-2001 гг. //Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Сб. научн. тр. МГИ НАН Украины, вып. 8. - Севастополь, 2003, с.90-97.
41. *Скопинцев Б.А.* О скорости разложения органического вещества отмершего фитопланктона. //Тр. Всесоюз. гидробиол. о-ва, т.1.- М.: Изд-во АН СССР, 1949, с.8-21.
42. *Каменир Ю.Г.* Размерная структура циклических систем: взаимосвязь параметров. //Экология моря, 1986, вып. 24, с. 42-51.
43. *Кирикова М.В., Стельмах Л.В.* Поглощение неорганических форм углерода и фосфора микропланктонным сообществом Севастопольской бухты. //Экология моря. Тр. ИнБЮМ НАНУ, 1988, вып. 29, с. 8-11.
44. *Кирикова М.В.* Сезонные изменения скорости поглощения реактивного фосфора микропланктонным сообществом Севастопольской бухты. //Экология, 1988, №3, с.45-50.
45. *Химия океана. Т.1. Химия вод океана.* М.: Наука, 1979. – 518 с
46. *Обобщенный перечень* предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно-безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ в воде водных объектов, используемых для рыбохозяйственных целей. – М.: Минрыбхоз СССР-Главрыбвод, 1990. – 46 с.
47. *Richard E. Zeebe, Dieter Wolf-Gladrow.* CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes. – Elsevier Oceanography Series ,65. London, 2001.- 346 p.
48. *Безбородов А.А., Еремеев В.Н.* Физико-химические аспекты взаимодействия океана и атмосферы. Киев, Наукова думка, 1984. – С.189.
49. *Evgeny Datner, Melchov Conzdez-Dalilu J. Magdalene Santana-Casiano, Richard Sempere.* Total organic and inorganic carbon exchange through the strait of Gibraltar in September 1997. //Deep Sea Research, 2001, I, № 48, 1217-1285 p.
50. *John J. Walsh, Dwight A. Dieterle Janson Lenos.* A numerical analysis of carbon dynamics of the Southern Ocean phytoplankton community: the roles of light and grazing in effecting both sequestration of atmospheric CO₂ and food availability to larval krill.// Deep Sea Research, 2001, I, № 48, 1-48 p.
51. *Хорн Р.* Морская химия. М., Мир, 1972, С.398.
52. *Савенко В.С.* Глобальный гидрологический цикл и геохимический баланс фосфора в океане.// Океанология, 2001, том 41, № 3, с. 379-385.
53. *Куфтаркова Е.А.* Сезонный карбонатный цикл изменений компонентов карбонатной системы в Севастопольской бухте. //Экология моря ,1980, вып.1, С. 41-47.
54. *Волков И.И., Савенко В.С.* Обзор исследований по химии и геохимии океана, проводившихся по грантам РФФИ в 1999 г. Вестник РФФИ. Проект 98-05-64725 (рук. П.Н. Маккавеев). www.rfbr.ru
55. *Ляхин Ю.И.* К вопросу о газовом обмене между океаном и атмосферой.// Гидрохимические процессы в океане. М.: ИОАН, 1985. С. 66 – 75.
56. *Ляхин Ю.И., Александров В.П., Пальшин Н.И.* Расчет баланса обмена СО₂ между океаном и атмосферой по акватории Атлантического, Индийского и Тихого океанов. //Исследование и освоение мирового океана. 1978. Л., Ленинградский гидрометеорологический институт. Вып.65. С.48 – 60.

57. *Сысоева И.В., Овсяный Е.И., Лопухин А.С., Кемп Р., Романов А.С., Сысоев А.А., Лопухин С.А.* Исследование состояния микропланктона и гидролого-гидрохимическая характеристика Севастопольской бухты, Черное море (по результатам наблюдений в 2004-2005 гг.). //Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Сб. научн. тр. МГИ НАН Украины, Севастополь, 2006 (в печати).

58. *Куфтаркова Е.А., Ковригина Н.П., Немировский М.С.* Оценка воздействия хозяйственно-бытовых и сбросных вод ТЭС на гидрохимические условия Севастопольской бухты //Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу. Севастополь, Аквавита, 1999,с.95-101.