

П.Д.Ломакин*, М.А.Попов**

**Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

***Институт биологии южных морей НАН Украины, г.Севастополь*

СТРУКТУРА И СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМОХАЛИННОГО ПОЛЯ В БАЛАКЛАВСКОЙ БУХТЕ И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ АКВАТОРИИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ КОНТАКТНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

На базе массивов стандартных океанографических наблюдений и спутниковых снимков в инфракрасном диапазоне рассмотрены закономерности структуры поля температуры и солёности вод в Балаклавской бухте и на акватории смежного с ней залива Мегало-Яло. Проанализированы вариации элементов структуры термохалинного поля, обусловленные сезонными факторами.

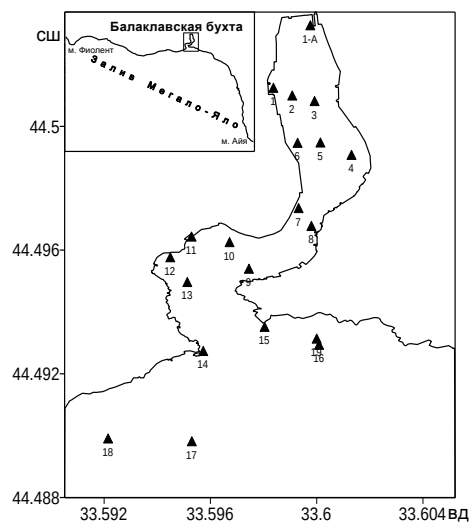
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *термохалинные поля, спутниковые наблюдения, Балаклавская бухта, Черное море.*

Длительное время Балаклавская бухта оставалась недоступной для экспериментальных океанологических исследований. С 2000 г. на акватории бухты в рамках ежемесячного комплексного океанологического мониторинга сотрудниками отдела Прикладной океанологии и марикультуры Института биологии южных морей (ИнБЮМ) НАН Украины ведутся регулярные комплексные океанологические исследования. Накопленные за десятилетний интервал времени эмпирические сведения в совокупности с небольшим массивом предшествовавших стандартных океанографических наблюдений, а также спутниковые данные позволили только сейчас получить более или менее адекватные представления о структуре и внутригодовой изменчивости полей температуры и солёности в Балаклавской бухте и смежной с ней акватории Черного моря.

Цель предлагаемой работы – выявить закономерности локальной трехмерной структуры и сезонной изменчивости элементов термохалинного поля в Балаклавской бухте и смежного с ней залива Мегало-Яло.

Рассматриваемая акватория расположена в юго-западной части Крымского полуострова и включает Балаклавскую бухту и примыкающий к ней, находящийся между мысами Фиолент и Айя, залив Мегало-Яло (рис.1).

Исходные данные и методы исследования. Исследования полей температуры и солёности в Балаклавской бухте выполнены на базе CTD-массива серии мониторинговых съемок, которые практически ежемесячно проводятся сотрудниками ИнБЮМ с 2000г., и к настоящему времени содержит около 200 океанографических станций и зондирований. Данный массив дополнен архивной информацией из 147 станций, выполненных гидрографическими службами СССР, Российской Федерации и Украины в 60 – 90-х гг. прошлого столетия. Отмеченные сведения, вследствие недостаточной обеспеченности исходной выборки, позволили получить, в основном, качественные представления о структуре и сезонных вариациях термохалинного поля в Балаклавской бухте для теплого и холодного полугодий.



Р и с . 1 . Схема исследуемой акватории с обозначением сетки станций.

Более детально исследованы закономерности внутригодового хода температуры воды на поверхности в заливе Мегало-Яло. Это стало возможным, благодаря использованию массива ежесуточных спутниковых снимков в ИК-диапазоне за интервал времени с 1990 по 2010 гг. Данный массив сформирован в Южном научно-исследовательском институте морского рыбного хозяйства и океанографии (ЮгНИРО, г. Керчь). Средние для каждого календарного месяца го-

да значения температуры воды на поверхности моря и ее стандартное отклонение были рассчитаны по фактическим спутниковым данным, снятым в точке на карте, соответствующей заливу Мегало-Яло. Информация, приходившаяся на даты с признаками апвеллинга на рассматриваемой акватории, из общей исходной выборки была изъята.

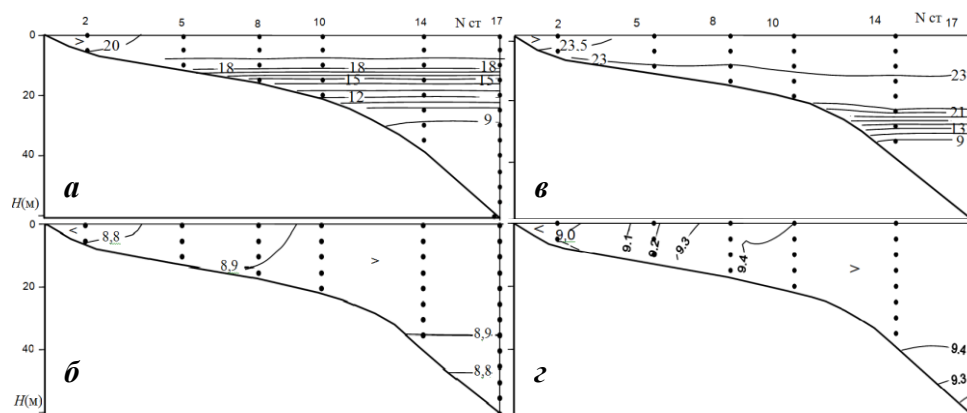
Обсуждение результатов. Структура и сезонная изменчивость поля температуры воды исследуемой акватории определяется следующими факторами:

- тепловым балансом поверхности моря и его сезонными вариациями,
- апвеллинговыми явлениями,
- объемом вод бухты и водообменом с прилегающей морской акваторией,
- ветровым режимом и климатическими особенностями примыкающего участка суши.

Накопленные к настоящему времени эмпирические данные позволяют оценить лишь закономерности структуры и внутригодового хода элементов поля температуры воды в бухте и в заливе Мегало-Яло, обусловленные сезонными явлениями.

На рис.2, а, б показано распределение температуры воды, осредненной для теплого (май – сентябрь) и холодного (ноябрь – март) сезонов года на разрезе вдоль осевой линии Балаклавской бухты. Здесь проиллюстрированы основные признаки фонового поля температуры и качественные сезонные различия его вертикальной стратификации.

В теплые месяцы года на преобладающей части акватории бухты поле температуры отличается ярко выраженной стратификацией. Лишь в мелководной кутовой части (глубина до 4 – 5 м), толща вод однородна по вертикали. Эти участки наиболее прогреты до средней за теплый период года температуры 20,1 °С. Для остальной части акватории бухты типичен верхний квазиоднородный слой толщиной ~ 10 м и средней температурой 19,8 – 20,0 °С, который между горизонтами 10 – 15 м подстигается слоем скачка с градиентом – 0,5 °С/м. В мористой части бухты на глубинах 50 – 60 м средняя для теплого времени года температура воды равна 8,9 – 8,1 °С (рис.2, а).



Р и с . 2 . Распределение температуры воды ($^{\circ}\text{C}$) на разрезе вдоль осевой линии Балаклавской бухты: осредненной для теплого (май – сентябрь) (*а*) и холодного (ноябрь – март) (*б*) сезонов года; фактической по данным съемок 18 июля 2007 г. (*в*) и 12 января 2004 г. (*г*).

В холодное полугодие вертикальная стратификация поля температуры сглаживается конвективными токами. Поле температуры однородно, абсолютный диапазон его пространственной изменчивости не превышает $0,5^{\circ}\text{C}$. Наиболее выхожена кутовая часть бухты, где средняя температура ($8,75 - 8,78^{\circ}\text{C}$) наименьшая. В слое $0 - 50$ м средняя температура изменяется от $8,9$ до $8,7^{\circ}\text{C}$, на 60 м температура воды $8,4^{\circ}\text{C}$ (рис.2, *б*).

На рис.2, *в*, *г* представлены графики фактического распределения температуры, построенные по результатам *CTD*-съемок, проведенных ИнБЮМ в теплый и холодный сезоны года. Видно, что фактические и осредненные поля имеют качественно аналогичную структуру. Это свидетельствует о том, что характерные признаки вертикальной стратификации поля температуры в Балаклавской бухте, выявленные нами на основе анализа сглаженных полей (рис.2, *а*, *б*), не связаны с искусственными операциями интерполяции и осреднения. Они адекватно отражают реальные свойства изучаемых сезонных полей.

Анализ данных фактических наблюдений позволил дополнить и уточнить представление о рассматриваемом параметре среды, сложившееся на основе анализа осредненной информации. В частности, удалось выявить следующее.

Температура воды на поверхности бухты имеет четко выраженный сезонный ход. Наименьшие ее фактические значения наблюдались в феврале ($6,8^{\circ}\text{C}$), наибольшие – в августе ($26,8^{\circ}\text{C}$). Рост температуры начинается в апреле, наиболее интенсивно она повышается в мае-начале июня, достигая максимума в июле – августе. Охлаждение начинается в сентябре и наиболее интенсивно в ноябре – начале декабря. Размах внутригодовой температурной гармоника на поверхности Балаклавской бухты достигает $20,1^{\circ}\text{C}$. На горизонте 10 м кривая внутригодового хода температуры воды имеет аналогичный вид, но с небольшим (примерно $1 - 2$ декады) запаздыванием по времени, и с меньшим размахом $18,7^{\circ}\text{C}$.

Вертикальная стратификация поля температуры в Балаклавской бухте формируется в апреле – мае, и сохраняется до конца теплого полугодия. В октябре – ноябре она разрушается конвективными токами, и в холодную

половину года толща вод по всей акватории бухты однородна по вертикали. Интервалы времени с апреля по май и с октября по ноябрь можно считать переходными сезонами во внутригодовом ходе температуры воды в бухте.

Более детально удалось рассмотреть внутригодовой ход температуры воды на поверхности моря в заливе Мегало-Яло, акватория которого наилучшим образом обеспечена исходной (спутниковой) информацией, что позволило рассчитать средние месячные значения температуры воды на поверхности моря и ее стандартное отклонение.

Кривая внутригодового хода температуры воды на поверхности в заливе Мегало-Яло с коридором стандартного отклонения изображена на рис.3.

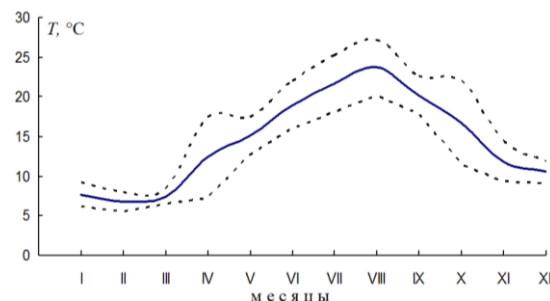
Во временном ходе температуры воды на поверхности примыкающего к Балаклавской бухте участка моря можно выделить основные сезоны года: летний (с мая по сентябрь) и зимний (с ноября по март), и короткие переходные сезоны, весенний (апрель) и осенний (октябрь). Сезоны различаются температурным фоном и степенью изменчивости температуры воды, которая в данном случае представлена стандартным отклонением.

Самый теплый месяц – август, со средней месячной температурой на поверхности моря $23,7^{\circ}\text{C}$. Наибольшая интенсивность прогрева верхнего слоя вод характерна для промежутка времени с марта по апрель. В это время года температура воды увеличивается на $1,6^{\circ}\text{C}$ за декаду. С такой же, примерно, интенсивностью происходит максимальное выхолаживание верхнего слоя вод исследуемой акватории в конце теплого сезона, которое наблюдается с октября по ноябрь.

Для летних месяцев типична повышенная изменчивость температуры воды, которая оценивается стандартным отклонением от средней месячной нормы в $2,4 - 3,6^{\circ}\text{C}$ (рис.3).

Самый холодный месяц – февраль с температурой $6,8^{\circ}\text{C}$. Для холодного сезона года типична минимальная изменчивость температуры исследуемой акватории, которая оценивается стандартным отклонением от средних месячных норм в $0,9 - 2,6^{\circ}\text{C}$ (рис.3).

Переходные сезоны года, весенний апрель и осенний октябрь, характеризуются максимальной изменчивостью температуры на поверхности моря со стандартным отклонением $5,1 - 5,3^{\circ}\text{C}$. Средняя для этих месяцев температура $12,4$ и $16,7^{\circ}\text{C}$ соответственно (рис.3).



Р и с . 3 . Внутригодовой ход температуры воды ($^{\circ}\text{C}$) на поверхности моря в заливе Мегало-Яло по спутниковым данным. Пунктиром обозначен коридор стандартного отклонения.

Отметим, что короткие переходные сезоны по сравнению с основными сезонами года, теплым и холодным, выявленные нами во внутригодовом ходе температуры воды у берегов Балаклавы, типичны для ряда полей гидрофизических и гидрохимических элементов вод Черного моря в целом [1], а также для отдельных его акваторий [2 – 5].

Представленный выше ре-

зультат свидетельствует об отсутствии заметных различий в фоновой структуре и сезонных вариациях температуры воды в Балаклавской бухте и прилегающем к ней заливе Мегало-Яло. Сведения, заимствованные из литературных источников [2, 4, 5], подтверждают подобные закономерности для смежных с исследуемой акваторией участков черноморского крымского побережья, омываемых ОЧТ (восточный, южный и западный берега Крыма).

Структура и внутригодовая изменчивость поля солёности. Поле солёности, по сравнению с полем температуры, отличается более сложной фоновой структурой. В кутовой части бухты солёностный фон понижен. Здесь солёность, в основном, обусловлена поступлением пресных вод со стоком р. Балаклавка и склоновым стоком. Для мористой части Балаклавской бухты, солёностный режим которой определяется, преимущественно, водообменом с прилегающей морской акваторией, типичен повышенный фон исследуемого параметра среды. Вместе с тем, заметное локальное распреснение в этой части вызывает антропогенный источник, – городской коллектор сточных вод. Его оголовок выведен в море у юго-восточного берега бухты, вблизи мыса Балаклавский. Менее существенный эффект локального распреснения в мористой части связан с природным Георгиевским источником субмаринной разгрузки, находящимся у юго-западного берега Балаклавской бухты (рис.4).

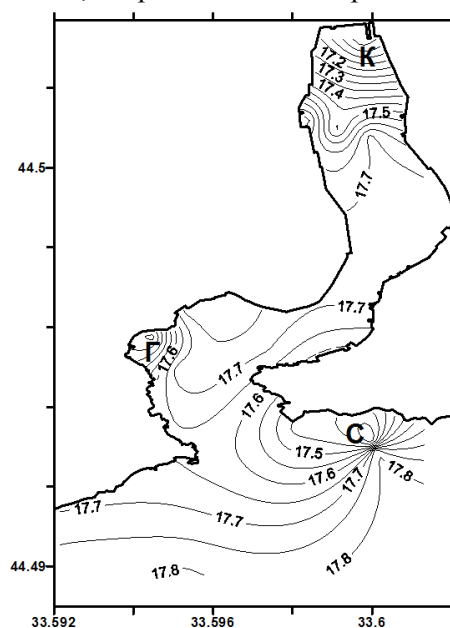
К значимым факторам, вызывающим внутригодовую изменчивость солёности, можно отнести следующие:

- весенней паводок р.Балаклавка и материковый сток, обусловленный интенсивными осадками и таянием снега в области ее водосбора, влияние которых наиболее ощутимо в кутовой части бухты;
- воздействие азовоморских вод, проникающих в системе ОЧТ в мористую часть бухты и заметно понижающих здесь солёность в весенние и летние месяцы года;
- осенне-зимняя термическая конвекция, выравнивающая вертикальную стратификацию вод, и способствующая повышению солёности в открытой части Балаклавской бухты;
- сезонный ход сумм атмосферных осадков.

Основные особенности структуры фонового поля солёности и ее сезонные различия в Балаклавской бухте проиллюстрированы на рис.4, 5.

В течение всего года вертикальная стратификация средних сезонных полей

Р и с . 4 . Фоновое распределение солёности (‰) на поверхности Балаклавской бухты с обозначением участков максимального распреснения. К – кутовая часть бухты, С – оголовок системы сброса сточных вод г.Балаклава, Г – Георгиевский источник субмаринной разгрузки.



солёности выражена слабо.

В теплое время года наиболее распресненная кутовая часть бухты имеет среднюю солёность около 17,9 ‰. На остальной преобладающей части акватории солёность изменяется в пределах 18,0 – 18,4 ‰ (рис.4, 5, *а*).

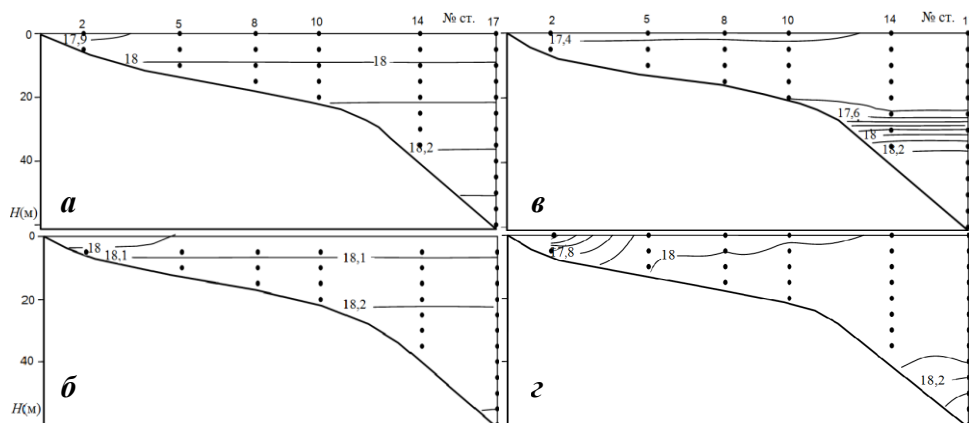
В холодное время года при тех же структурных признаках, что и в летние месяцы, солёность всей толщи вод выше на 0,1 – 0,2 ‰ (рис.5, *б*). Это объясняется влиянием осенне-зимней конвекции, в результате которой более солёные воды подповерхностной структурной зоны моря смешиваются с менее солёными поверхностными водами. Даже выпадающие на поверхность моря атмосферные осадки (их, согласно [6], в зимние месяцы года в исследуемом регионе существенно больше по сравнению с летними) не искажают этот эффект.

Как и в случае температуры, средние сезонные (рис.5, *а, б*) и фактические (рис.5, *в, г*) поля солёности характеризуются сходными признаками, что подтверждает их адекватность природной ситуации. В качестве исключения можно отметить фиксируемый летом в фактических полях солёности слой скачка, который по результатам отдельных съёмок достаточно хорошо выражен. Вертикальный градиент солёности в слое скачка около 0,05 ‰/м (рис.5, *в*). Эта структурная особенность обусловлена влиянием локальных источников пресных вод. В среднем, для теплого времени года поле солёности, она сглажена.

Ниже приведен результат анализа фактических сведений, накопленных в ходе мониторинговых исследований ИнБЮМ, дополняющий изложенные выше представления о поле солёности исследуемой акватории.

Средняя солёность на поверхности моря за весь временной интервал наблюдения изменялась от $17,30 \pm 0,03$ в кутовой части до $17,74 \pm 0,02$ ‰ на взморье. На горизонте 10 м – от $17,69 \pm 0,02$ ‰ до $17,81 \pm 0,02$ ‰ соответственно.

Наиболее ярко сезонный цикл солёности выражен в кутовой части бухты. Минимальная солёность 13,40 ‰ здесь была зафиксирована нами в марте 2004 г. Понижение солёности до 14,81 – 14,85 ‰ в кутовой части отмечают также в начале лета и в осенние месяцы года после ливневых дождей.



Р и с . 5 . Распределение солёности (‰) на разрезе вдоль осевой линии Балаклавской бухты: осредненной для теплого (май – сентябрь) (*а*) и холодного (ноябрь – март) (*б*) сезонов года; фактической по данным съёмок 18 июля 2007 г. (*в*) и 12 января 2004 г. (*г*).

В ходе мониторинга Балаклавской бухты минимальная соленость 17,27 ‰, в ее мористой части нами была зафиксирована 27 апреля 2005 г. Анализ соответствующей пробы воды на биогенные элементы подтвердил ее азовоморскую природу.

Максимальная соленость (18,01 ‰) на поверхности в мористой части бухты, вызванная зимней конвекцией, отмечена нами 5 декабря 2001 г.

Кроме р. Балаклавка и склонового стока на исследуемой акватории имеются еще два источника пресных вод. В глубоководную часть бухты, как отмечено выше, пресные воды поступают от Георгиевского субмаринного источника и родников, активизирующихся во время дождей, а также из основного выпуска хозяйственно-бытовых сточных вод г. Балаклавы, оголовков которого расположен на выходе из бухты, у м. Балаклавский. Соленость в зоне влияния этих источников, как правило, ниже на 0.2-0.5‰ по сравнению с окружающим фоном. Причем, антропогенный источник распреснения более мощный, Его след в поле солености фиксируется, практически, каждой съемкой. Тогда как влияние Георгиевского источника, водность которого изменяется в зависимости от погодных условий и сезонных явлений, менее значимо (рис.4).

Как правило, распреснение за счет перечисленных источников локализуется в тонком верхнем слое (до первых десятков сантиметров) и на глубине 1 м уже не регистрируется. Однако, во время интенсивных паводков в кутовой части бухты вся толща вод от поверхности до дна (глубины до 4 – 5 м) значительно распресняется.

Отметим, что выявленные нами качественные признаки структуры и сезонной изменчивости термохалинного поля, а также их численные показатели в районе Балаклавской бухты хорошо согласуются с соответствующими характеристиками для участков крымского побережья, расположенных к востоку и западу от исследуемой акватории: Южного берега Крыма и Севастопольского взморья [2, 4, 5]. Это позволяет сопоставить средние значения термохалинных индексов для различных интервалов времени, рассчитанных для этих участков и выявить возможные климатические изменения.

Так, средняя температура на поверхности в Балаклавской бухте за время мониторинга ИнБЮМ с 2000 по 2010 гг. равна $15,0 \pm 0,7$ °С, а на глубине 10 м $14,1 \pm 0,6$ °С. Интересно отметить, что эти характеристики, практически, не отличаются от среднеемноголетних (1926 – 1959 гг.) значений температуры воды, которые были получены В.И.Зацем [2] для Ялтинского залива. На поверхности здесь средняя температура воды равнялась 14,8 и 14,2 °С на глубине 10 м. Данный факт свидетельствует о схожести теплового режима этих участков Крымского побережья.

Соленость, наблюдаемая нами в Балаклавской бухте по сравнению с соленостью за временной интервал 1926 – 1959 гг. в районе Ялтинского залива, оказалась несколько ниже: на поверхности на 0,26 ‰, на горизонте 10 м – на 0,28 ‰

Несмотря на то, что сопоставляемые значения относятся к различным, хотя и близко расположенным участкам побережья, они могут отражать реальный долгопериодный процесс понижения солености у берегов Крыма.

О наличии отрицательного тренда солености в поверхностных водах в прибрежной зоне Южного берега Крыма свидетельствует результат статьи [7]. В ней показано, что значение отрицательного статистически обеспеченного тренда солености за время с 1960 по 2000 гг. в районе ЮБК достигло 0,3 ‰.

Наблюдаемое в последние десятилетия понижение солености в прибрежных водах Черного моря связывают с уменьшением солезапаса в верхнем слое открытой его части. Согласно [8] запас соли здесь снизился в результате нарушения соотношения между составляющими солевого баланса, обусловленными выпадающими на поверхность моря атмосферными осадками, материковым стоком и испарением. Временные параметры этого явления сопоставимы с климатическим масштабом.

Известно [2], что на режим солености у побережья Крыма существенное влияние оказывает Азовское море. Поэтому, наблюдаемое на современном этапе понижение солености у Крымского побережья и, в частности, в районе Балаклавы также может быть связанным с усиливавшимся влиянием Азовского моря на Керченский пролив. В результате качественных изменений в атмосферной циркуляции в течение последних десятилетий в проливе преобладает перенос вод из Азовского моря, которые подпитывают Основное черноморское течение [9].

Заключение. На основе массивов стандартных океанографических наблюдений и спутниковых данных выявлены закономерности структуры и сезонной изменчивости температуры и солености вод в Балаклавской бухте и смежного с ней залива Мегало-Яло.

Показано, что в поле температуры исследованной акватории отчетливо выделяются два основных сезона – теплый (май – сентябрь) и холодный (ноябрь – март), качественно различающиеся вертикальной стратификацией данной характеристики водной среды. Для теплого сезона типична вертикальная структура с верхним квазиоднородным слоем, слоем скачка и придонным слоем плавного падения температуры с глубиной. В холодный сезон вертикальная стратификация в поле температуры отсутствует. В результате зимней термической конвекции формируется однородная по вертикали толща вод. Короткие, характерные для исследуемой акватории, как и для смежных с нею участков черноморского побережья, переходные сезоны года, весенний (апрель) и осенний (октябрь) отличаются максимальной временной изменчивостью температуры воды.

Поле солености, по сравнению с полем температуры, отличается более сложной фоновой структурой. В бухте расположены три локальные области распреснения: кутовая часть, куда поступают воды р. Балаклава и склоновый сток; участок вблизи Георгиевского источника субмаринной разгрузки; участок, подверженный антропогенному распреснению от городского коллектора сточных вод. Соленость в этих местах на 0,2 – 0,5 ‰ ниже по сравнению с окружающим фоном.

Внутригодовые вариации солености в Балаклавской бухте определяют следующие факторы. Весенний паводок р. Балаклава и материковый сток, обусловленный интенсивными осадками и таянием снега в области ее водосбора, влияние которых наиболее ощутимо в кутовой части бухты; азовоморские воды, проникающие в системе ОЧТ в мористую часть бухты и по-

нижающие здесь соленость в весенние и летние месяцы года; осенне-зимняя термическая конвекция, выравнивающая вертикальную стратификацию, и способствующая повышению солености толщи вод на 0,1 – 0,2 ‰ в зимние месяцы года по сравнению с летними. В течение всего года вертикальная стратификация солености, как правило, слабо выраженная. В теплое полугодие в поле солености формируется слой скачка.

Подтвержден отмечаемый в океанографической литературе долгопериодный процесс понижения солености вод у берегов Крыма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Булгаков Н.П., Блатов А.С., Иванов В.А., Косарев А.И., Тужилкин В.С.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 240 с.
2. *Зац В.И., Лукьяненко О.А., Яцевич Г.В.* Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 120 с.
3. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма). – Киев: Наукова думка, 1992. – 244 с.
4. *Белокопытов В.Н., Ломакин П.Д., Субботин А.А., Щуров С.В.* Фоновая характеристика и сезонная изменчивость вертикальной стратификации термохалинного поля у побережья Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. – вып.1(6). – С.22-28.
5. *Субботин А.А., Троценко О.А., Ломакин П.Д., Щуров С.В.* Основные черты гидрологической структуры на шельфе Крыма и их влияние на развитие прибрежной марикультуры / Марикультура мидий на Черном море. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – С.27-34.
6. *Справочник по климату Черного моря.* – М.: Гидрометеиздат, 1974. – 406 с.
7. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Изменчивость солености поверхностных вод в прибрежной зоне Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – вып.12. – С.22-28.
8. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Уровень Черного моря: прошлое, настоящее, будущее. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – 210 с.
9. *Ломакин П.Д., Панов Д.Б., Спиридонова Е.О.* Изменения важнейших составляющих экосистемы Керченского пролива после сооружения Тузлинской дамбы / Препринт. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – 73 с.

Материал поступил в редакцию 12.05.2010 г.