

ФОРМИРОВАНИЕ ХОЛОДНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ В ШЕЛЬФОВО-СКЛОНОВОЙ ЗОНЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Куклев С.Б., Зацепин А.Г., Подымов О.И.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: kuklev@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 15.02.2019, одобрена к печати 24.07.2019

В работе представлен обзор существующих гипотез о районах формирования и механизмах распространения вод холодного промежуточного слоя (ХПС) Черного моря. Выполнена проверка статистической гипотезы о связи параметров ХПС в шельфово-склоновой зоне северо-восточной части Черного моря с температурной приводно-го слоя атмосферы в центральной части восточного циклонического круговорота. Полученные высокие значения коэффициентов корреляции (~ 0.98) подтвердили зависимость параметров ХПС в период его формирования от температуры воздуха над северо-восточной частью Черного моря. Подтверждено также одно из положений «конвективно-адвективной» гипотезы Овчинникова и Попова (1987) о временном сдвиге приблизительно в 2 месяца между процессами вторжения холодных воздушных масс на акваторию Черного моря и появлением вод развитого ХПС в прибрежной зоне моря в районе Геленджика.

Ключевые слова: Черное море, гидрологическая структура, холодный промежуточный слой, конвекция, адвекция, корреляционный анализ

Введение

Холодный промежуточный слой (ХПС) является важным элементом гидрологической структуры Черного моря, изменчивость которого во многом определяет закономерности гидрофизических процессов деятельного слоя вод, динамику абиотических и биотических составляющих морской экосистемы. Важность ХПС заключается в том, что этот слой является продуктом зимнего конвективно-турбулентного перемешивания вод. При его формировании происходит кислородная вентиляция вод, а также подъем биогенных элементов в фотический слой, обеспечивающий весеннюю вспышку первичной биологической продукции.

Несмотря на более чем вековую историю исследований гидрологической структуры Черного моря, многие вопросы закономерностей формирования и трансформации ХПС остаются изученными не в полной мере. В частности, до настоящего времени обсуждаются гипотезы о районах формирования его вод и их последующей адвекции по акватории моря. В разное время высказывались различные гипотезы о формировании ХПС. Первоначально была сформулирована «конвективная» гипотеза (Шпиндлер, 1893; Зубов, 1938; Книпович, 1932), которая

предполагала формирование ХПС как остаточного перемешанного слоя, сохраняющегося в нижней части области проникновения зимней конвекции. Но эта гипотеза не давала ответы на многие вопросы. В частности, почему во многих районах моря температура ХПС ниже температуры поверхностных вод в период их наибольшего выхолаживания?

Позже была выдвинута «адвективная» гипотеза (Колесников, 1953) – предположение, что ХПС формируется на обширном шельфе в северо-западной части Черного моря и оттуда распространяется вместе с Основным черноморским течением (ОЧТ) по всей его акватории. Ее обоснования приведены в работах (Филиппов, 1965, 1968). Эта гипотеза принималась как основная до 80-х годов прошлого столетия. Сомнение в ее достоверности было высказано И.М. Овчинниковым и Ю.И. Поповым (Овчинников, Попов, 1987). По мнению этих авторов, они не нашли в работах Филиппова, а также в работе Колесникова убедительных примеров, подтверждающих «адвективную» и «конвективную» гипотезы. Повторный анализ тех же материалов и материалов собственных экспедиционных исследований позволил выдвинуть новую гипотезу («конвективно-адвективную») и предположить, что наиболее вероятным районом формирования ХПС является не северо-западная часть Черного моря, а области основных циклонических круговоротов (ЦК) в период наибольшего выхолаживания поверхностного слоя (рис. 1).

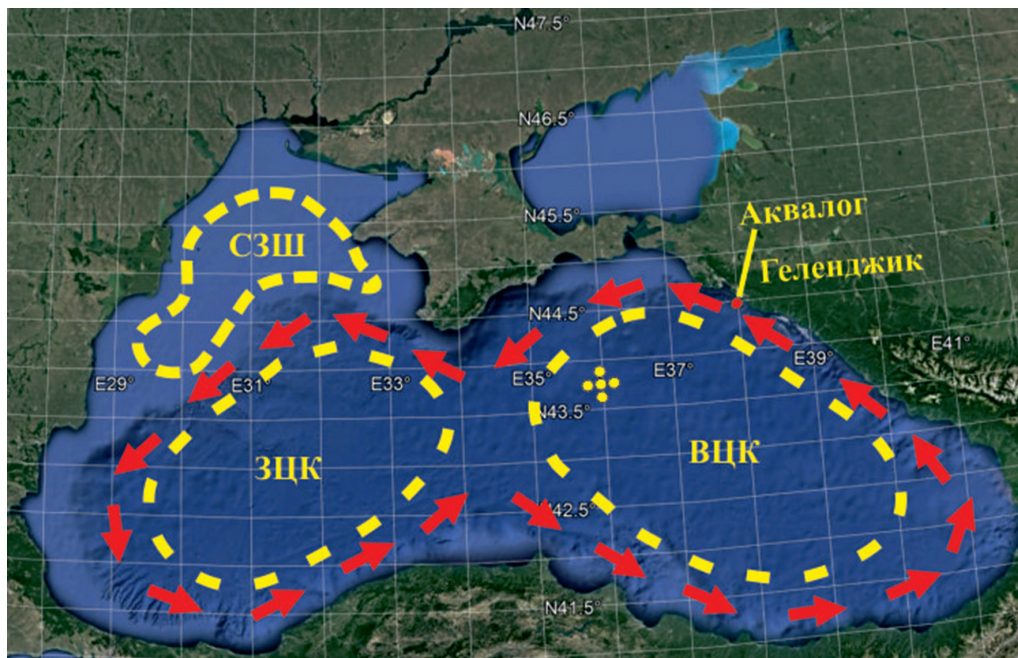


Рис. 1. Схема общей циркуляции вод Черного моря (на карте Google). ЗЦК и ВЦК – западный и восточный циклонические круговороты соответственно. СЗШ – северо- западная шельфовая зона. Красный кружок – место установки профилографа «Аквалог». Желтые кружки в центре ВЦК – точки температурных данных европейской базы Era-Interim. Красные стрелки – ОЧТ.

В центральных частях циклонических круговоротов хорошо выражена куполообразность распределения всех гидрологических параметров, обусловленная подъемом постоянного галоклина к поверхности моря (вплоть до глубины 20–30 м), что создает наиболее благоприятные условия для зимнего конвективного перемешивания, выхолаживания и уплотнения вод в зимний период.

В соответствии с гипотезой Овчинникова и Попова, нисходящие конвективные токи и динамический подъем в центральной части круговоротов приводит к взаимодействию поверхностных и глубинных вод, в результате которого происходит формирование новой водной массы – ХПС. Обновленный ХПС характеризуется не только низкой температурой воды, но и высоким содержанием кислорода. За счет вовлечения вод черноморского галоклина он также насыщается биогенными элементами. Участвуя в общей циклонической циркуляции, обновленные воды ХПС распространяются от центров круговоротов к их периферии вдоль соответствующих их плотности изопикнических поверхностей. Это движение происходит достаточно медленно, и в результате обновленные воды достигают, например, шельфово-склоновой зоны северо-восточного побережья моря только через 2–3 месяца (Овчинников, Попов, 1987). При этом процесс носит спорадический характер. Адвекция холодных вод ХПС происходит в виде отдельных линз, формирование которых соответствует периодам проникновения воздушных масс с минимальной температурой на акваторию моря (рис. 2).

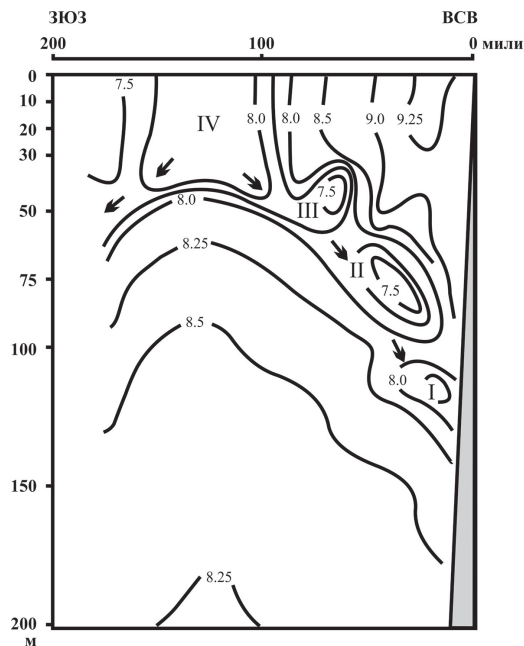


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры воды Черного моря на разрезе от Геленджика к центру восточного циклонического круговорота (НИС «Акванавт», февраль 1984 г.).

Таким образом, в соответствии с «конвективно-адвективной» гипотезой, основным районом формирования вод ХПС, включая ХПС шельфово-склоновой зоны восточного побережья моря, являются центральные части циклонических круговоротов.

Позже ряд авторов высказали сомнения в том, что охлажденные воды центральной части циклонических круговоротов достигают периферии моря

и, соответственно, его шельфово-склоновой зоны (Oguz, Besiktepe, 1999). Они считали, что основным районом формирования охлажденных вод ХПС является шельфовая зона северо-западной части моря, откуда те распространяются вместе с ОЧТ. В некоторых работах (Тужилкин, 2008) также выделяют прикерченский очаг формирования холодных вод. Учитывая глобальный циклонический перенос в Черном море, существенного влияния на формирование вод ХПС восточного побережья он не оказывает.

Более приемлемая точка зрения заключается в том, что ХПС формируется как в центральных частях циклонических круговоротов, так и в северо-западной зоне моря, включая шельф и континентальный склон (Ivanov et al., 1997; Staneva and Stanev, 1997; Stanev et al., 2003; Тужилкин, 2008). Основываясь на многолетних данных натурных измерений, эти авторы дают оценку вклада указанных районов в формирование вод ХПС. Полученные результаты существенно разнятся, поэтому на основе указанных исследований однозначно утверждать о доминирующей роли того или иного района моря в формировании вод ХПС нельзя.

Для исследования процессов формирования вод ХПС и их распространения по акватории Черного моря используются методы математического моделирования. В частности, в одной из последних работ на эту тему (Miladinova et al., 2018) выполнено моделирование распространения пассивной примеси (трассеров), источник которой располагался в северо-западной части шельфовой зоны. По результатам моделирования получены схемы распространения трассеров, которые ОЧТ переносятся от источника до прибрежных участков северо-восточной части Черного моря и далее, вовлекаясь в общую бассейновую циркуляцию. В статье приводятся результаты расчетов климатической динамики вертикального распределения температуры воды и концентрации пассивной примеси в слое от поверхности до глубины 150 м в трех глубоководных районах моря. На представленных графиках видно, что пассивная примесь достигает центральных частей циклонических круговоротов и вовлекается в вертикальные обменные процессы, которые ограничены верхним 20–30 м слоем (в наиболее холодные зимы – до 40–50 м). Данные результаты, по мнению авторов, подтверждают доминирующую роль в формировании ХПС шельфовых вод северо-западной части моря, охлажденных в зимний период.

Однако необходимо обратить внимание, что охлажденные воды северо-западного шельфа достигают центральной части восточного циклонического круговорота только через несколько месяцев (начало каждого модельного расчета – январь), когда здесь уже активно происходят локальные процессы зимнего конвективно-турбулентного перемешивания, и часть охлажденных вод может распространиться в сторону шельфа. Кроме того, эти воды существенно опреснены речным стоком, их плотность недостаточна для достижения пикноклина в процессе зимнего конвективного перемешивания (Овчинников, Попов, 1987). Поэтому утверждение, что доминирующую роль в формировании ХПС играют охлажденные воды северо-западного шельфа, по-прежнему вызывает

сомнения. По крайней мере, оно не подтверждено для района шельфово-склоновой зоны северо-восточной части моря.

Необходимо отметить, что, несмотря на активное развитие методов математического моделирования, проблемы корректного воспроизведения в численных экспериментах некоторых физических процессов в морской среде остаются до сих пор актуальными. Прежде всего, для моделирования процесса конвекции следует пользоваться негидростатической моделью, а подавляющее число используемых ныне моделей циркуляции вод являются гидростатическими. Это связано и с ограничениями машинных ресурсов и необходимостью ограничивать пространственное разрешение моделей. В задачах динамики ХПС выбор вертикального разрешения модели имеет наиболее существенное значение. В описанной выше модели (Miladinova et al., 2018) хотя и используется неравномерная по вертикали сетка (70 слоев со сгущением к поверхности), но этого, как отмечают сами авторы, по-видимому, недостаточно для корректного описания обменных процессов в слое ХПС и на границе черноморского галоклина.

Кроме того, все известные модели испытывают существенную чувствительность к параметризации процессов вертикального турбулентного обмена. Полученные на черноморском гидрофизическом полигоне ИО РАН (Полигон «Геленджик») результаты показывают, что коэффициент вертикального турбулентного обмена испытывает существенную сезонную изменчивость. А в период активизации гидродинамических процессов (усиления ОЧТ, воздействия шторма и пр.) его величина может возрасти на порядок (Подымов и др., 2017). В модельных результатах (Miladinova et al., 2018) наличие трассеров в слое ниже галоклина можно отнести к численной ошибке, которая связана с некорректной параметризацией процессов вертикального турбулентного обмена.

Представленный обзор позволяет говорить о том, что ни предшествующие, ни современные исследования не дают однозначного ответа на вопрос об определяющей роли какого-либо района моря в формировании вод ХПС. Результаты настоящей работы частично решают этот вопрос для шельфово-склоновой зоны северо-восточной части моря.

Исходные данные и методика исследований

Для анализа динамики ХПС в период его формирования использованы данные измерений автоматизированного профилографа «Аквалог» (Островский и др., 2013). Заякоренная буйковая станция с «Аквалогом» (рис. 1), установленная на глубине ~270 м на континентальном склоне за бровкой шельфа акватории полигона «Геленджик» (траверз Толстого мыса, 7.5 км от берега), позволяет в заданном режиме (4 раза в сутки) сканировать водную толщу в слое от 25 до 250 м, выполняя совместные прецизионные измерения профилей температуры, солености, плотности и горизонтальных составляющих скорости течения с вертикальным разрешением 1–2 м. Со времени установки «Аквалога» в 2012 г. получен почти пятилетний ряд регулярных данных измерений. Перерывы

в наблюдениях, связанные с необходимостью замены элементов питания и проведения профилактических работ, составляют от нескольких дней до нескольких недель в зависимости от технических проблем и погодных условий. Данные измерений сохраняются на внутреннем накопителе зонда-профилографа. По завершению этапа исследований они передаются на береговой сервер (компьютер), переводятся в ASCII-коды, доступные для дальнейшей обработки и анализа стандартными программными средствами. Обработанные данные «Аквалога» позволяют строить графики временного хода вертикального распределения измеряемых параметров: CTD-данных, горизонтальных составляющих скорости течения и обратного акустического рассеивания. На рис. 3 представлен временной ход измеренных параметров за период с 6 февраля по 8 апреля 2017 г.

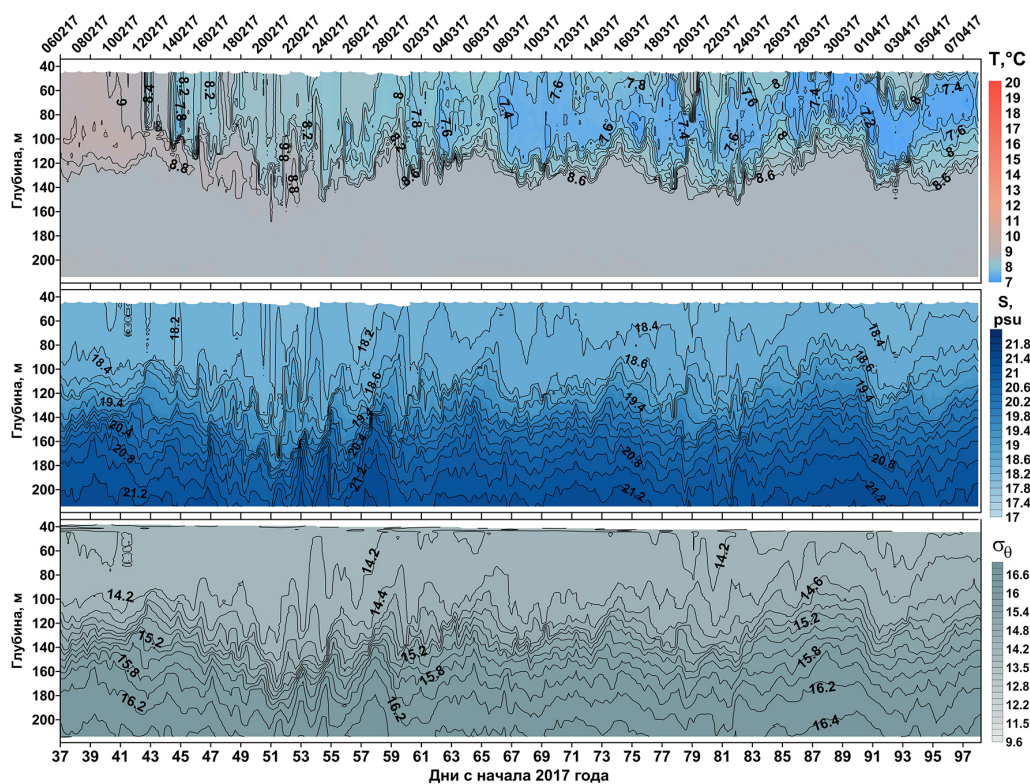


Рис. 3. Временная изменчивость температуры, солёности и условной плотности σ_θ по данным зонда-профилографа «Аквалог» с 6 февраля по 8 апреля 2017 г.

Отметим, что в 2017 г., впервые с 2013 г., мы наблюдали в районе проведения измерений появление вод ХПС с температурой ниже 8°C (то есть ХПС в его «классическом» представлении). Зима 2017 г. была одной из самых холодных в нынешнем столетии, что и сделало возможным формирование развитого ХПС. Как следует из полученных результатов, представленных на рис. 3, первое кратковременное появление слоя воды с температурой менее 8°C отмечено 13 февраля. По всей видимости, оно связано с локальными процессами охлаждения вод и конвекции. Но холодозапаса во вновь сформированном слое оказалось недостаточно, и последующие шторма и турбулентное вертикальное перемешивание привели к «размыву» этого слоя. Только к началу марта наметился процесс устойчивого формирования ХПС, и далее развитие процессов в слое

соответствовало представлениям о его сезонной динамике. Отмеченный в конце марта минимум температуры в ХПС составил 6.9°C . В среднем, вплоть до второй половины июня, толщина ХПС изменялась мало и была порядка 70 м.

Укажем на особенность динамики вертикального распределения температуры воды (изопикнических поверхностей) – наличие квазипериодических циклов колебаний с повторяемостью 5–15 суток. Данный феномен получил ранее следующее объяснение (Зацепин и др., 2013). Меандрирование ОЧТ приводит к квазипериодическому формированию антициклонической и циклонической завихренности в шельфово-склоновой зоне Черного моря с юго-восточными и северо-западными течениями в точке постановки «Аквалога». В силу геострофического приспособления, юго-восточное вдольбереговое течение вызывает подъемом изопикн, тогда как северо-западное вдольбереговое течение – их заглабление.

В предположении связи формирования ХПС с атмосферными зимними процессами для совместного анализа с результатами измерений «Аквалога» был подготовлен массив данных температурных характеристик атмосферного воздуха над регионом Черного моря. В качестве одного из источников приняты данные ГМС г. Геленджика. В части тенденций изменения температуры береговые метеостанции предоставляют достоверную информацию.

Однако ГМС Геленджика удалена от предполагаемого района формирования охлажденных вод ХПС. Поэтому для центральной части восточного циклонического круговорота был сформирован массив данных температуры приводного слоя атмосферы по реанализу ERA-Interim. Для анализа данных ERA-Interim был взят «квадрат» между 43 и 44° с.ш. и 36 и 37° в.д. (рис. 1). Было рассмотрено пять расчетных узлов внутри квадрата: середина (43.75° с.ш., 36.0° в.д.) и четыре дополнительных, лежащих посередине между центральным узлом и углами «квадрата» (рис. 4): (43.87° с.ш., 36.0° в.д.), (43.75° с.ш., 36.12° в.д.), (43.67° с.ш., 36.0° в.д.), (43.75° с.ш.,

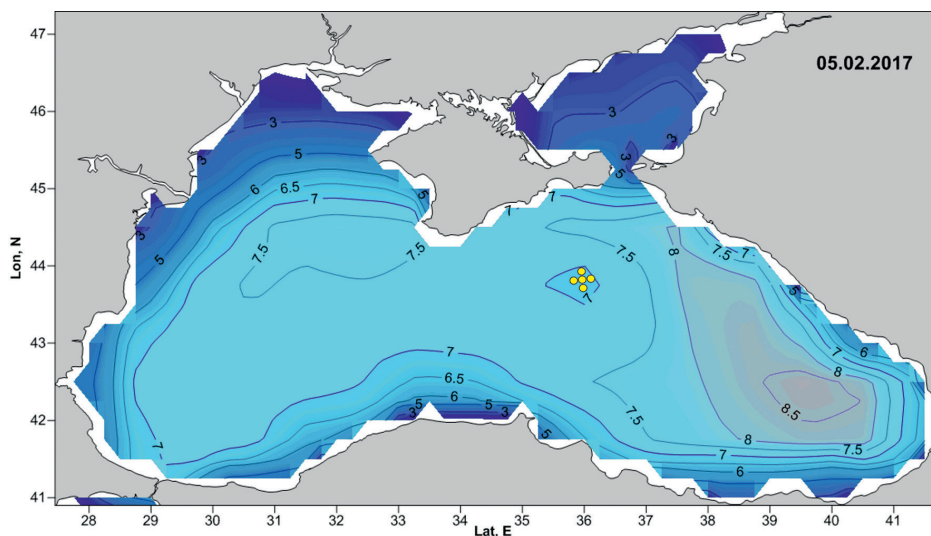


Рис. 4. Температура поверхности моря ($^{\circ}\text{C}$) по данным ERA-Interim на 05.02.2017 г. Желтые кружки – точки формирования массива данных температуры приводного слоя атмосферы.

35.87°в.д.). Значения в пяти узлах отличались незначительно, поэтому для дальнейших расчетов было взято их среднее значение. Также был выполнен сравнительный анализ данных ERA-Interim с температурными данными ГМС Геленджика, который показал хорошую сходимость обоих рядов. Выявлено единственное существенное отличие: в данных ГМС Геленджика более выражены пики отрицательных значений температуры, что вполне объясняется прогревом над морем холодного воздуха, поступающего с берега. Это отличие не отразилось на результатах сравнительного анализа выбранными методами.

Обращают на себя внимание низкие значения ($< 7.00^{\circ}\text{C}$) температуры поверхности на прибрежных участках моря (рис. 4). На наш взгляд, это обусловлено двумя причинами. Во-первых, ошибками интерполяции граничных данных ERA-Interim (на суше температуры поверхности приравнены к «0»). Во-вторых, причинами, которые могут найти свою физическую интерпретацию. Отдельные минимумы связаны с береговым стоком более холодных речных вод, вкуче с общей тенденцией проявления более низких значений температуры в прибрежной шельфовой зоне. Опресненные речным стоком воды распространяются в приповерхностном слое моря (до глубины 20–25 м) и отделяются от нижележащих вод небольшим перепадом плотности, периодически разрушаемым сильными ветровыми воздействиями (Подымов, Зацепин, 2016). В периоды существования этого перепада глубина конвективного перемешивания и связанного с ним выхолаживания вод ограничена приповерхностным слоем, и благодаря этому его температура опускается до более низких значений по сравнению с водами глубоководной части моря, где поверхностное опреснение отсутствует. Очевидно, что эта приповерхностная водная масса не может впоследствии сформировать ХПС, поскольку является менее соленой и плотной.

К сожалению, условия работы «Аквалоба» не позволяют регистрировать параметры приповерхностного слоя моря. Его подповерхностная плавучесть, ниже горизонта расположения которой осуществляется зондирование толщи воды, находится на глубине 25–30 м и заглубляется в период активизации течения до 45–50 м. Поэтому в представленных данных «Аквалоба» (рис. 3) мы не наблюдаем слоя приповерхностных менее соленых и охлажденных вод.

Регулярные ряды параметров морской среды и атмосферного воздуха позволяют использовать для их совместного анализа корреляционные методы. Была поставлена задача проверки статистической гипотезы о связи характеристик ХПС в шельфово-склоновой зоне северо-восточной части Черного моря с температурой воздуха, в частности с температурой приводного слоя атмосферы в центральной части восточного циклонического круговорота. В исследованиях рассматривалась фаза охлаждения поверхностных вод – период формирования ХПС. В качестве контрольной характеристики ХПС принята минимальная температура в его ядре.

Первичные данные «Аквалоба» были усреднены с шагом по глубине 1 м. В качестве значения температурного минимума для каждого профиля была взята минимальная зарегистрированная температура внутри ХПС. Как отмечалось ранее, характеристики ХПС подвержены изменчивости с периодом 5–15 сут, поэтому, что-

бы исключить из анализа влияние выявленных колебаний, полученные значения температурных минимумов были осреднены сперва посуточно, а затем сглажены скользящим средним в 20-дневном окне.

Результаты

Как уже указывалось, основной задачей настоящих исследований была проверка статистической гипотезы о взаимосвязи температуры воздуха в центре восточного циклонического круговорота с минимальной температурой воды в ядре ХПС, которая измерялась зондом-профилографом «Аквалог» в верхней области континентального склона северо-восточной части Черного моря в зимний период. Для этого по осредненным вышеописанной методикой температурным данным (рис. 5) был выполнен корреляционный анализ, результаты которого представлены в таблице 1. Наибольшая корреляция между температурой воздуха и минимальной температурой воды в ядре ХПС получена при временном сдвиге в 59 дней по данным ГМС Геленджика и в 61 день по данным ERA-Interim для центра восточного круговорота.

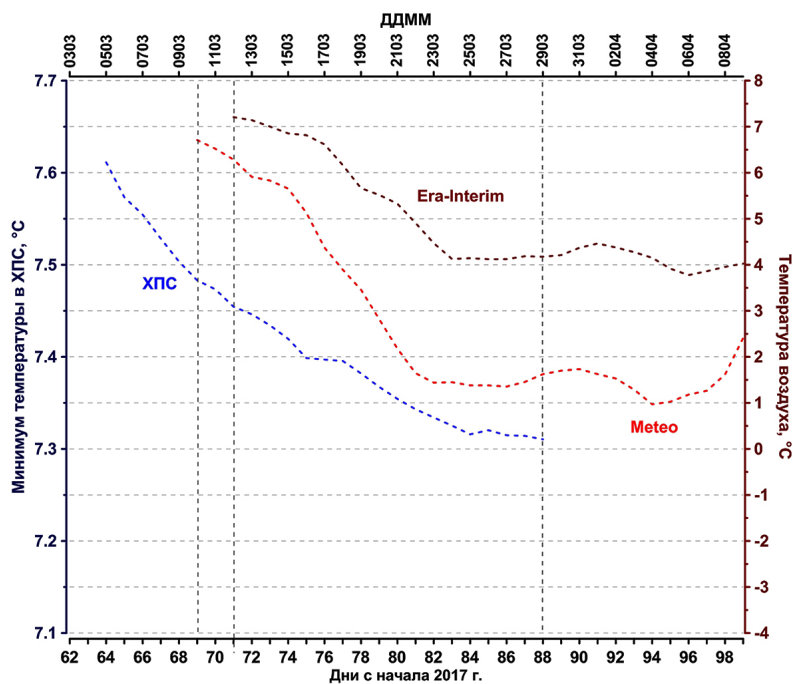


Рис. 5. Временное изменение минимальной температуры в ядре ХПС по данным зонда-профилографа «Аквалог», температуры воздуха по данным ГМС г. Геленджика (Meteo) и по данным ERA-Interim для района центральной части восточного циклонического круговорота. Данные по температуре воздуха сдвинуты на 59 дней вперед относительно данных «Аквалога» для ГМС Геленджика и на 61 день вперед для данных ERA-Interim.

Все данные сглажены плавающим средним в окне 20 дней.

Таблица 1. Коэффициент корреляции между температурой воздуха (данные геленджикской метеостанции и ERA-Interim) и минимальной температурой воды в ХПС (данные зонда-профилографа «Аквалог»)

Сравниваемые параметры	Временной сдвиг (сут)	Коэффициент корреляции
$T_{\text{Геленджик}} / T_{\text{ХПС}}$	59	0.98
$T_{\text{Вост. круг}} / T_{\text{ХПС}}$	61	0.98

Высокие значения коэффициентов корреляции (~ 0.98) говорят о возможности существования устойчивой связи в исследуемых процессах. Временное запаздывание в 2 мес максимального развития ХПС в склоновой зоне моря в районе г. Геленджика относительно атмосферного температурного минимума над центральной областью восточного циклонического круговорота не противоречит «конвективно-адвективной» гипотезе Овчинникова–Попова. Подтверждается также спорадический характер процесса формирования ХПС.

Тем не менее полученные результаты не позволяют ответить на главный дискуссионный вопрос: где были сформированы воды ХПС? Высокие значения коэффициентов корреляции получены как для данных ERA-Interim (центральная часть восточного циклонического круговорота), так и для данных ГМС Геленджика, находящейся в значительном удалении от предполагаемого района формирования вод ХПС. Можно утверждать, что такая же высокая корреляция будет получена для атмосферных данных, выбранных и в других точках северо-восточной части Черного моря, что подтверждает тот факт, что изменчивость температурных условий определяется единым атмосферным процессом.

Предположим, что воды ХПС действительно сформировались в центральной области восточного круговорота на расстоянии примерно 100 миль от точки установки «Аквалога». Для того чтобы достичь этой точки, сформированным водам потребовалось время порядка 60 сут. Имея эти данные, нетрудно оценить, что скорость их распространения по направлению к северо-восточному берегу составляет порядка 3 см/с. Это значение не противоречит здравому смыслу. В то же время результаты моделирования, представленные в работе (Miladinova et al., 2018), говорят о том, что воды ХПС, сформированные в северо-западной части моря, в массовом виде достигают района г. Геленджика не ранее мая–июня, а то и июля–августа, что на несколько месяцев позднее реального появления вод ХПС с минимальной температурой в данной области моря. Таким образом, можно заключить, что формирование охлажденных вод в центральной части восточного круговорота и их последующее квазиизопикническое распространение является наиболее вероятным механизмом обновления ХПС в шельфово-склоновой зоне северо-восточной части Черного моря, зарегистрированного «Аквалогом» в районе г. Геленджика в 2017 г.

Выводы

В работе выполнена проверка статистической гипотезы о связи изменчивости температуры атмосферного воздуха в избранных точках северо-восточной части Черного моря (г. Геленджик и центральная область восточного циклонического круговорота) с температурой вод ХПС над континентальным склоном Черного моря в районе г. Геленджика. Для анализа выбран период формирования ХПС в холодную зиму 2017 г. Получены высокие значения коэффициентов корреляции (~ 0.98), которые подтвердили возможность существования устойчивой зависимости изменчивости температуры воды в ХПС от температуры воздуха над северо-восточной частью Черного моря. Подтверждено также одно из положений «конвективно-адвективной» гипотезы Овчинникова-Попова о временном сдвиге в ~ 2 месяца между процессами вторжения холодных воздушных масс на акваторию Черного моря и появления вод развитого ХПС в прибрежной зоне моря в районе Геленджика. Полученная оценка средней скорости (3 см/с) квазиизопикнического распространения новообразованных вод ХПС от центральной части восточного циклонического круговорота к его периферии (в частности, к северо-восточному берегу Черного моря) не противоречит здравому смыслу.

Тем не менее, приобретенные результаты не позволяют абсолютно однозначно идентифицировать районы формирования вод ХПС. Этот вопрос требует дальнейших исследований, в том числе с применением методов численного моделирования.

Работа выполнена в рамках госзадания (тема 0149-2019-0014) и гранта РФФИ № 19-45-230002.

Литература

- Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. О природе короткопериодных колебаний основного черноморского пикноклина, субмезомасштабных вихрях и реакции морской среды на катастрофический ливень 2012 г. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2013. Т. 53. № 6. С. 717–732.
- Зубов Н.Н. Морские воды и льды. М.: Гидрометеиздат, 1938. 453 с.
- Книпович Н.М. Гидрологические исследования в Черном море // Труды Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции. 1932. Вып. 10. 272 с.
- Колесников А.Г. Годовой ход температуры, устойчивости и вертикального турбулентного обмена тепла в открытой части Черного моря // Труды Морского гидрофизического института АН СССР. 1953. Вып. 3. С. 3–13.
- Овчинников И.М., Попов Ю.И. Формирование холодного промежуточного слоя в Черном море // Океанология. 1987. Т. 27. № 5. С. 739–746.
- Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
- Подымов О.И., Зацепин А.Г. Сезонная и межгодовая изменчивость солёности воды в геленджикском районе Черного моря по данным судового мониторинга // Океанология

2016. Т. 56. № 3. С. 370–383.
- Подымов О.И., Зацепин А.Г., Островский А.Г. Вертикальный турбулентный обмен в черноморском пикноклине и его связь с динамикой вод // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 4. С. 546–559.
- Тужилкин В.С. Сезонная и многолетняя изменчивость термохалинной структуры вод Черного и Каспийского морей и процессы ее формирования // Диссертация. М.: Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2008. 313 с.
- Филиппов Д.М. К вопросу о холодном промежуточном слое в Черном море // *Океанология*. 1965. Т. 5. № 4. С. 635–641.
- Филиппов Д.М. Циркуляция и структура вод Черного моря // М.: Наука, 1968. 136 с.
- Шпиндлер И.Б. Результаты гидрологических исследований Черного моря в 1890–1891 гг. // Морской сборник. 1893. № 11. С. 1–32.
- Ivanov L.I., Beşiktepe Ş., Özsoy E. The Black Sea Cold Intermediate Layer // In: Özsoy E., Mikaelyan A. (eds) *Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea / NATO ASI Series (Series 2: Environment)*. Dordrecht: Springer, 1977. Vol. 27. P. 253–264. DOI: 10.1007/978-94-011-5758-2_20. Miladinova S., Stips A., Garcia-Gorriz E., Macias Moy D. Formation and changes of the Black Sea cold intermediate layer // *Progress in Oceanography*. 2018. Vol. 167. P. 11–23.
- Oguz T., Besiktepe S. Observations on the Rim Current structure, CIW formation and transport in the Western Black Sea // *Deep-Sea Res.* 1999. Vol. 46A. P. 1733–1753.
- Stanev E.V., Bowman M.J., Peneva E.L., Staneva J.V. Control of Black Sea intermediate water mass formation by dynamics and topography: Comparison of numerical simulations, surveys and satellite data // *J. Mar. Res.* 2003. Vol. 61. P. 59–99.
- Staneva J.V., Stanev E.V. Cold water mass formation in the Black Sea. Analysis on numerical model simulations // In: Ozsoy E., Mikaelyan A. (Eds.), *Sensitivity to change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea*. NATO ASI Series. Kluwer Academic Publishers, 1997. P. 375–393.

FORMATION OF THE COLD INTERMEDIATE LAYER IN THE SHELF-SLOPE NORTHEASTERN PART ZONE OF THE BLACK SEA

Kuklev S.B., Zatsepin A.G., Podymov O.I.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: kuklev@ocean.ru
Submitted 15.02.2019, accepted 26.08.2019*

The paper presents an overview of the existing hypotheses about the formation areas and the distribution mechanisms of the cold intermediate layer (CIL) in the Black Sea. The testing of the statistical hypothesis about the relationship of the CIL parameters in the shelf-slope zone of the Black Sea Northeastern part with the temperature of the atmosphere surface layer in the central part of the eastern cyclonic gyre is performed. The obtained high values of the correlation coefficients (~0.98) confirmed the dependence of the CIL parameters during its formation period from the air temperature over the Northeastern part of the Black Sea. One of the concepts of the “convective-advective” hypothesis by Ovchinnikov and Popov (1987) about approximately 2 months time shift between the processes of cold air masses invasion

into the water area of the Black Sea and the developed CIL waters appearance in the coastal zone of the Gelendzhik area is also confirmed.

Keywords: Black Sea, cold intermediate layer, convection, advection, correlation analysis

References

- Fillipov D.M.* Cirkulyaciya i struktura vod Chernogo morya (Circulation and Structure of the Black Sea Waters). Moscow: Nauka, 1968, 136 p.
- Fillipov D.M.* K voprosu o holodnom promezhutochnom sloe v Chernom more (To the Problem of the Cold Intermediate Layer of the Black Sea). *Okeanologiya*, 1965, Vol. 5, No. 4, pp. 635–641.
- Ivanov L.I., Beşiktepe Ş., and Özsoy E.* The Black Sea Cold Intermediate Layer. In: Özsoy E., Mikaelyan A. (eds) Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea, NATO ASI Series (Series 2: Environment), Dordrecht: Springer, 1977, Vol. 27, pp. 253–264, doi: 10.1007/978-94-011-5758-2_20.
- Knipovich N.M.* Hidrologicheskie issledovaniya v Chernom more (Hydrological Research in the Black Sea). *Trudy' Azovo-Chernomorskoj nauchno-promy'slovoj e'kspedicii*, 1932, No. 10, 272 p.
- Kolesnikov A.G.* Godovoj hod temperatury', ustojchivosti i vertikal'nogo turbulentnogo obmena tepla v otkry'toj chasti Chernogo morya (The Annual Cycle of Temperature, Buoyancy Frequency and Vertical Turbulent Heat Exchange in the Open Part of the Black Sea). *Tr. Morskogo gidrofizicheskogo instituta AN SSSR*, 1953, No. 3, pp. 3–13.
- Miladinova S., Stips A., Garcia-Gorriz E., and Macias Moy D.* Formation and changes of the Black Sea cold intermediate layer. *Progress in Oceanography*, 2018, Vol. 167, pp. 11–23.
- Oguz T. and Besiktepe S.* Observations on the Rim Current structure, CIW formation and transport in the Western Black Sea. *Deep-Sea Res.*, 1999, Vol. 46A, pp. 1733–1753.
- Ostrovskii A.G., Zatsepina A.G., Solov'ev V.A., Czibul'skij A.L., and Shvoev D.A.* Avtonomny'j mobil'ny'j apparatno-programmny'j kompleks vertikal'nogo zondirovaniya morskoy sredy' na zayakorennoj bujkovoj stantsii (Autonomous Mobile Hardware and Software Complex of the Marine Environment Vertical Sounding on the Anchored Buoy Station). *Okeanologiya*, 2013, Vol. 53, No. 2, pp. 259–268.
- Ovchinnikov I.M. and Popov Yu.I.* Formirovanie holodnogo promezhutochnogo sloya v Chernom more (Formation of the Cold Intermediate Layer in the Black Sea). *Okeanologiya*, 1987, Vol. 27, No. 5, pp. 739–746.
- Podymov O.I. and Zatsepina A.G.* Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' solenosti vody' v gelendzhikskom raione Chernogo morya po dannym sudovogo monitoring (Seasonal Anomalies of Water Salinity in Gelendzhik Region of the Black Sea According to the to ship monitoring). *Okeanologiya*, 2016, Vol. 56, No. 3, pp. 370–383.
- Podymov O.I., Zatsepina A.G., and Ostrovskii A.G.* Vrtikal'ny'j turbulentny'j obmen v chernomorskom piknokline i ego svyaz' s dinamikoj vod (Vertical Turbulent Exchange in the Black Sea Pycnocline and its Connection With Water Dynamics). *Okeanologiya*, 2017, Vol. 57, No. 4, pp. 546–559.
- Shpindler I.B.* Rezul'taty' gidrologicheskikh issledovanij Chernogo morya v 1890–1891, (The Results of the Black Sea Hydrological Research in 1890–1891). *Morskoy sbornik*, 1893, No. 11, pp. 1–32.
- Stanev E.V., Bowman M.J., Peneva E.L., and Staneva J.V.* Control of Black Sea intermediate water mass formation by dynamics and topography: Comparison of numerical simulations, surveys and satellite data. *J. Mar. Res.*, 2003, Vol. 61, pp. 59–99.

- Staneva J.V. and Stanev E.V.* Cold water mass formation in the Black Sea. Analysis on numerical model simulations. In: Sensitivity to change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea, Ozsoy E., Mikaelyan A. (Eds.), NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers, 1997, pp. 375–393.
- Tuzhilkin V.S.* Sezonnaya i mnogoletnyaya izmenchivost' termohalinnoi struktury' vod Chernogo i Kaspijskogo morej i procesy' eyo formirovaniya. Dissertatsiya. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2008, 313 p.
- Zatsepin A.G., Ostrovskii A.G., Kremenetskiy V.V. et al.* O prirode korotkoperiodny'h kolebanij osnovnogo chernomorskogo piknoklina, submezomasshtabny'h vihryah i reaktsii morskoy sredy' na katastroficheskij liven' 2012 g. (On the Nature of Short-Period Oscillations of the Main Black Sea Pycnocline, Submesoscale Eddies, and Response of the Marine Environment to the Catastrophic Shower of 2012). *Izv. RAN. Fiz. Atmosf. i Okeana*, 2013, Vol. 53, No. 6, pp. 717–732.
- Zubov N.N.* Morskie vody i l'dy (Sea waters and ice). Moscow: Gidrometeoizdat, 1938, 453 p.