

# Экспериментальные и экспедиционные исследования

УДК 551.465 (262.5)

В.Н. Белокопытов

## Межгодовая изменчивость обновления вод холодного промежуточного слоя Черного моря в последние десятилетия

На основе архивных гидрологических данных, современных данных буев-профилемеров и массива спутниковых данных о температуре поверхности моря оценивается межгодовая изменчивость обновления вод холодного промежуточного слоя Черного моря за последние 20 лет. Описывается методика оценки интенсивности обновления вод этого слоя по данным о температуре поверхности моря в зимний период без привлечения вертикальных профилей температуры. Отмечается, что в последние 50 лет наблюдается чередование периодов интенсивности вентиляции верхнего слоя моря. Анализируются связи температуры воды холодного промежуточного слоя с зимней температурой воздуха по данным метеорологических станций северного побережья Черного моря и с соленостью поверхностного слоя моря, подчеркивается роль последнего фактора.

**Введение.** В работах, посвященных различным характеристикам гидрологической структуры вод Черного моря, большое внимание уделяется холодному промежуточному слою (ХПС). Этот слой минимальных температур между сезонным и постоянным пикноклинами, традиционно выделяемый по изотерме 8°C, является результатом зимнего конвективного перемешивания в центрах циклонических круговоротов, а также в шельфовых районах.

В большинстве работ по многолетней изменчивости вод ХПС [1 – 4 и др.] подчеркивается роль термических атмосферных условий как основного внешнего фактора, влияющего на процессы вентиляции вод в зимний период. На фоне общей глобальной тенденции к потеплению климата региональная изменчивость климата может иметь свои особенности с проявлением противоположных тенденций. Поэтому исследования долгопериодных изменений термохалинной структуры вод Черного моря и, в частности, такой характерной его черты, как ХПС, не теряют своей актуальности.

В настоящей статье, являющейся продолжением работы [3], приведены оценки обновления вод ХПС за последние десятилетия. В связи с общим сокращением количества экспедиционных работ в открытой части моря использовался дополнительный источник информации – спутниковые данные о температуре поверхности моря.

**Материалы наблюдений и методика обработки данных.** Для расчета среднегодовых значений температуры воды на глубине минимума ХПС использовались данные океанографических наблюдений. Осреднение для всей глубоководной части моря (>200 м) значений минимальных температур за

© В.Н. Белокопытов, 2010

каждый год производилось для периода май – ноябрь (период повышения температуры ХПС). За 1996 – 2008 гг. обработаны данные 3880 станций, в том числе 7 автономных дрейфующих буев-профилемеров *Argo*. До 1996 г. использовались результаты из работы [3], рассчитанные по той же методике.

В качестве информации о температуре воды на поверхности моря был использован массив спутниковых данных *AVHRR Pathfinder SST ver. 5* за 1986 – 2008 гг., созданный в университете Майами (США) и *NOAA NODC* (США) [5].

Рассчитывались среднемесячные значения температуры воды на поверхности моря для трех основных районов обновления вод ХПС: центров восточного и западного циклонических круговоротов, а также для мористой части северо-западного шельфа. Для анализа использовались данные для февраля, так как в этом месяце образование новых вод ХПС наблюдается наиболее часто. Положение центров круговоротов определялось по минимальным значениям температуры; площадь осреднения принималась постоянной, равной средней площади, ограниченной среднеклиматической изопикной  $\sigma_t = 14,4$  для февраля в обоих круговоротах (рис. 1, б). Для северо-западного шельфа среднемесячные значения вычислялись для зоны от п-ова Тарханкут до  $30^\circ$  в. д. (рис. 1, б). Выбор этого района обусловлен тем, что только в этой части шельфа средняя многолетняя плотность воды достаточно высока, что способствует опусканию охлажденных вод до верхней границы ХПС в открытой части моря.

Для количественной оценки интенсивности обновления вод ХПС в каждом из указанных районов автором предлагается относительный показатель (индекс) охлаждения поверхностного слоя, определяемый как

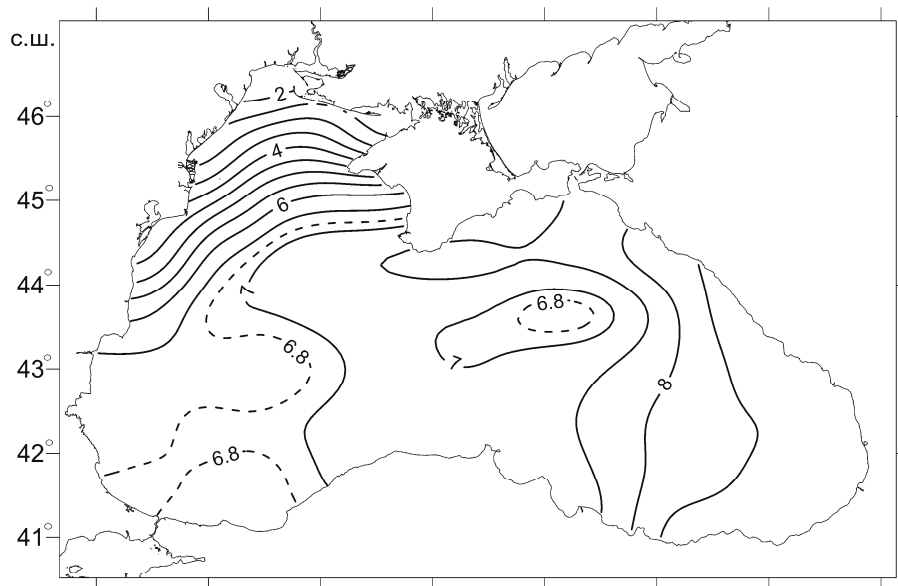
$$C_{\text{хпс}} = K(T_i - T_K)/(T_{\text{max}} - T_{\text{min}}),$$

где  $T_i$  – среднемесячная температура воды на поверхности для февраля;  $T_K$  – климатическая температура воды на поверхности для февраля;  $T_{\text{max}}$  – верхняя граница температуры воды ХПС,  $8^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{min}}$  – температура воды, при которой происходит интенсивное обновление ХПС: для западного и восточного круговоротов  $5^\circ\text{C}$ , для мористой части шельфа  $4^\circ\text{C}$ ;  $K$  – нормировочный коэффициент ( $-1 \leq C_{\text{хпс}} \leq 1$  при  $K = -2$ ).

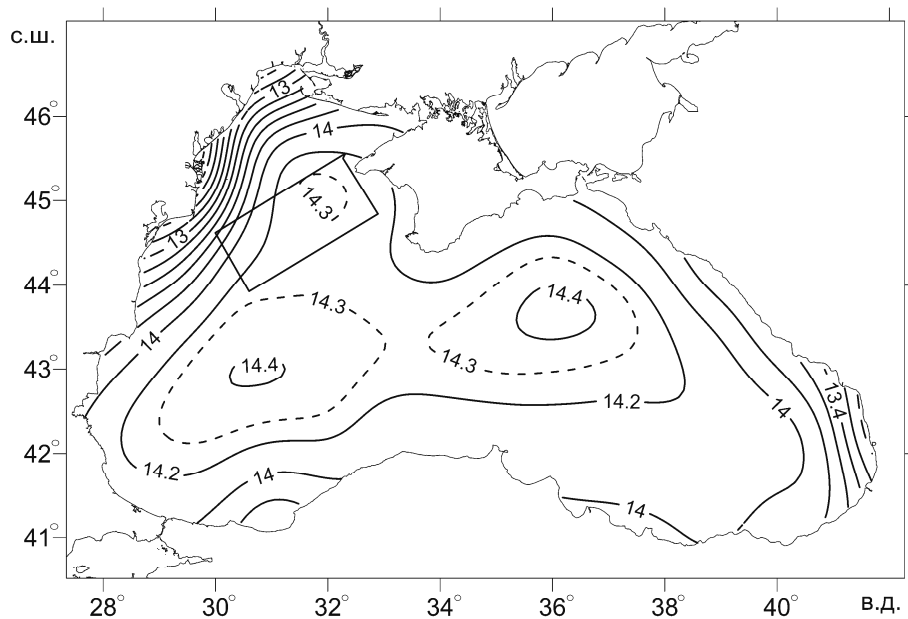
При значении  $C_{\text{хпс}} = 1$  достигается максимальная степень обновления вод ХПС; значения, близкие к нулевым, соответствуют среднеклиматическому состоянию; при  $C_{\text{хпс}} = -1$  ХПС не обновляется.

Критерии выбора температуры, при которой происходит интенсивное обновление вод, основаны на анализе сезонного хода температуры и плотности в ХПС (рис. 2). Перед началом зимнего охлаждения ядро «старого» ХПС в центрах циклонических круговоротов залегает на уровне изопикн 14,9 – 15,0. При климатической солености для этих районов  $18,4\text{‰}$  в феврале никакое охлаждение не может привести к уплотнению поверхностных вод до указанных значений. Из наблюдений известно, что при интенсивной конвекции над куполами пикноклина происходит усиленный вертикальный обмен с высокосолеными водами галоклина и соленость может повышаться до  $18,7\text{‰}$ . В этом случае понижение температуры до  $4,5 - 5^\circ\text{C}$  приводит к повышению плотности до 14,8, что обеспечивает проникновение новых вод в верхнюю часть «старого» ХПС. Климатическая температура  $6,8^\circ\text{C}$  (рис. 1, а)

соответствует плотности  $\sigma_t = 14,4$ , при этом новые охлажденные воды опускаются до верхней границы «старого» слоя, и обновление вод происходит постепенно в течение весенне-летнего периода посредством турбулентного теплообмена.

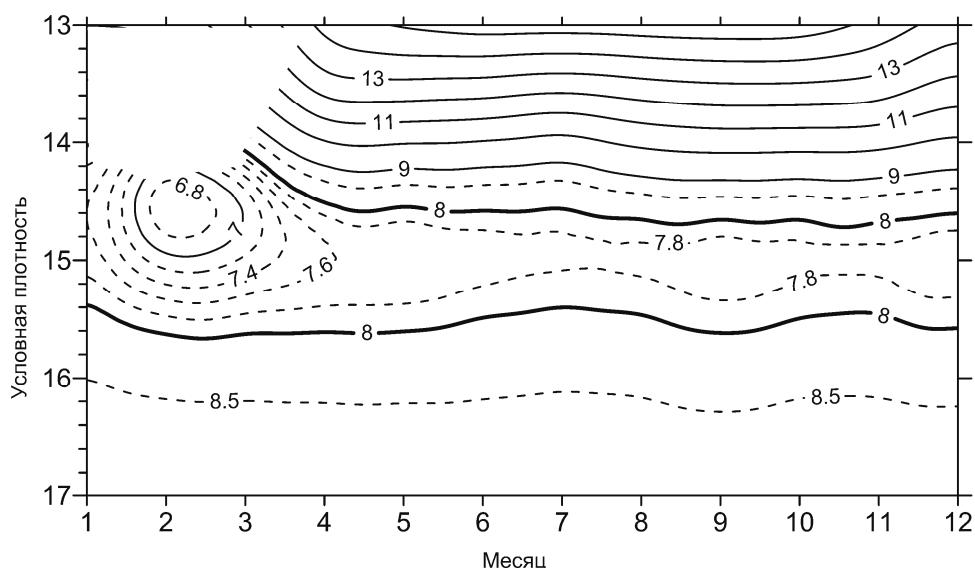


а



б

**Р и с. 1.** Климатические поля для февраля: *а* – температура воды (°С) на поверхности; *б* – условная плотность воды на поверхности (прямоугольником указан район северо-западного шельфа, для которого проводились расчеты)



**Р и с. 2.** Климатический сезонный ход температуры (°С) в верхнем слое моря для западного циклонического круговорота в изопикнических координатах

Для оценки атмосферных условий зимнего охлаждения вод использовались данные морских гидрометеорологических станций Одесса, Севастополь и Феодосия для февраля. Среднемесячные значения температуры воздуха представлялись в виде нормированных аномалий  $A_i = (T_i - T_B)/\sigma$ , где  $T_B$  – среднее значение температуры воздуха для февраля за климатический период 1961 – 1990 гг.,  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение среднемесячных значений за тот же период.

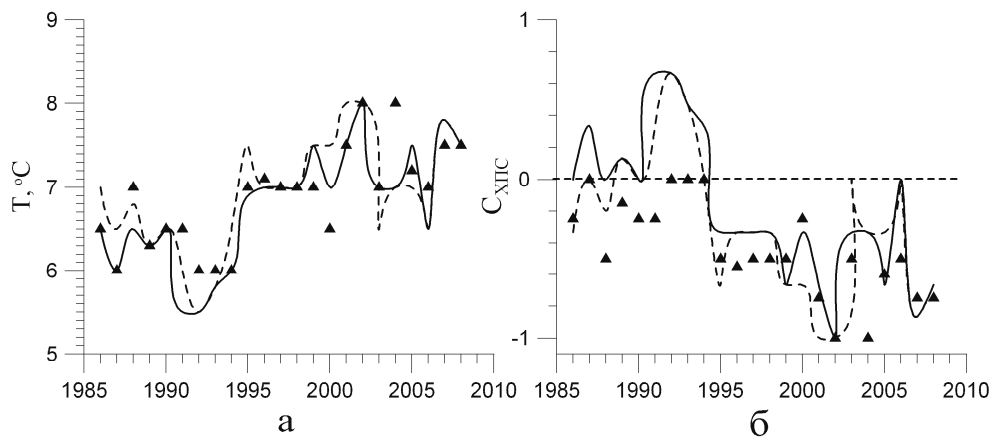
**Анализ результатов.** При анализе рядов температуры воды на поверхности в зимний период (рис. 3) и температуры воды в ядре ХПС (рис. 4) выявлены следующие особенности. Начиная с 1995 г. интенсивность обновления вод ХПС в Черном море в целом ниже климатической нормы. Исключение составили 2003, 2004, 2006 гг., которые соответствуют средноклиматическим условиям.

Если рассматривать долгопериодную цикличность, то в последние 50 лет наблюдается чередование периодов интенсивности вентиляции верхнего слоя моря: в 1950-е гг. – обновление вод ХПС выше климатической нормы, в 1960 – 1970-е гг. – слабое обновление, в 1985 – 1995 гг. – выше нормы, после 1995 г. – слабое обновление.

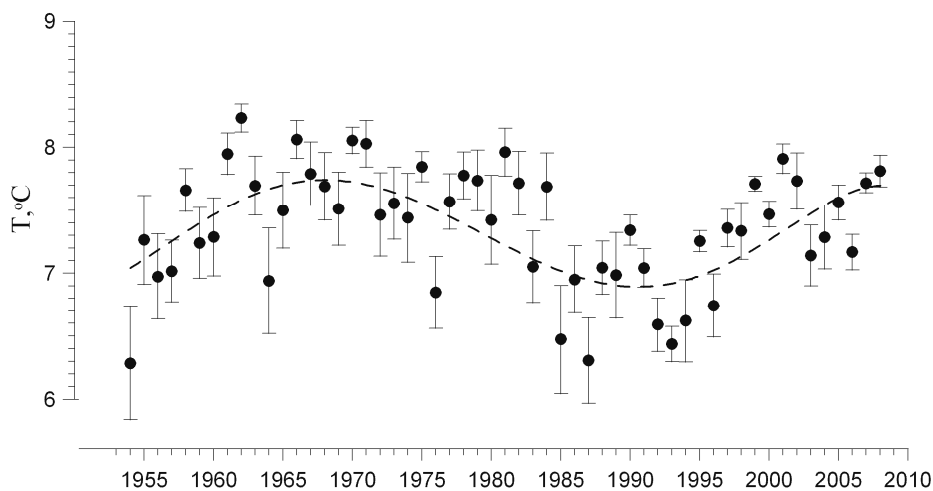
Колебания температуры воды для восточного и западного круговоротов полностью согласованы по знаку аномалий. До 2002 г. интенсивность обновления вод была выше в восточном циклоническом круговороте, в 2003 – 2005 гг. – в западном.

Индекс охлаждения  $C_{\text{хпс}}$  для мористой части шельфа за рассматриваемый период постоянно имел более низкие значения, чем для открытой части моря, за исключением 2000 г. Это может свидетельствовать об уменьшении вклада шельфовых вод в обновление ХПС. Следует отметить, что даже для периода

интенсивного охлаждения 1991 – 1994 гг. индекс не превысил среднеклиматического значения. Возможно, для шельфовых вод следует учитывать большее количество параметров, так как одного плотностного критерия недостаточно. В северо-западной части моря, кроме плотностной конвекции, определенную роль в обновлении вод ХПС играют процессы сползания охлажденных вод по дну континентального склона.



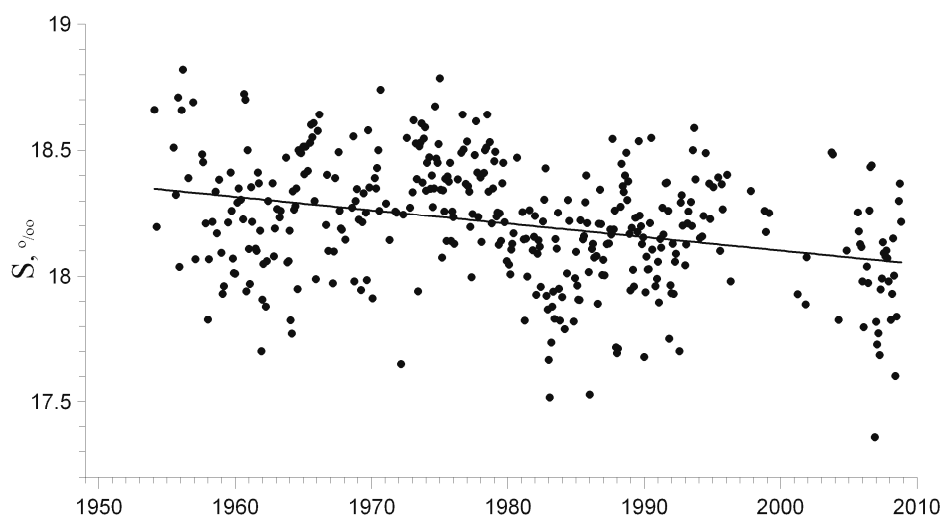
**Р и с. 3.** Временной ход: *a* – среднемесячной температуры воды на поверхности; *б* – относительного показателя охлаждения  $C_{ХПС}$  (сплошная линия отображает значения для восточного циклонического круговорота, штриховая – для западного, треугольники – для мористой части северо-западного шельфа)



**Р и с. 4.** Временной ход средней температуры в ядре ХПС за период май – ноябрь каждого года (отрезками изображен разброс значений, соответствующий  $\pm 1 \sigma$ , штриховой линией – аппроксимация полиномом 6-й степени)

Временные изменения термических характеристик ХПС, полученных по спутниковым (рис. 3) и гидрологическим (рис. 4) данным, в целом идентичны. Заметные отличия, например в 1990, 1996 гг., могут объясняться различной обеспеченностью гидрологическими данными. С 1990-х гг. значительно сократилось количество океанографических экспедиций, особенно в центральной части моря. Буи-профилемеры *Argo*, функционирующие в Черном море с 2002 г., главным образом перемещаются в зоне Основного Черноморского течения, лишь четыре из семи работавших буев попадали в центральную часть циклонических круговоротов. Перераспределение вод ХПС после периода зимнего охлаждения обычно приводит к тому, что их минимальная температура наблюдается на периферии моря. Поэтому гидрологические данные последних лет, полученные в основном в прибрежных районах, могут занижать значение средней по морю температуры ХПС. Спутниковая информация имеет гораздо большую регулярность во времени и пространстве, но ее получение ограничено наличием облачности, что в условиях Черного моря в зимний период вносит свои погрешности.

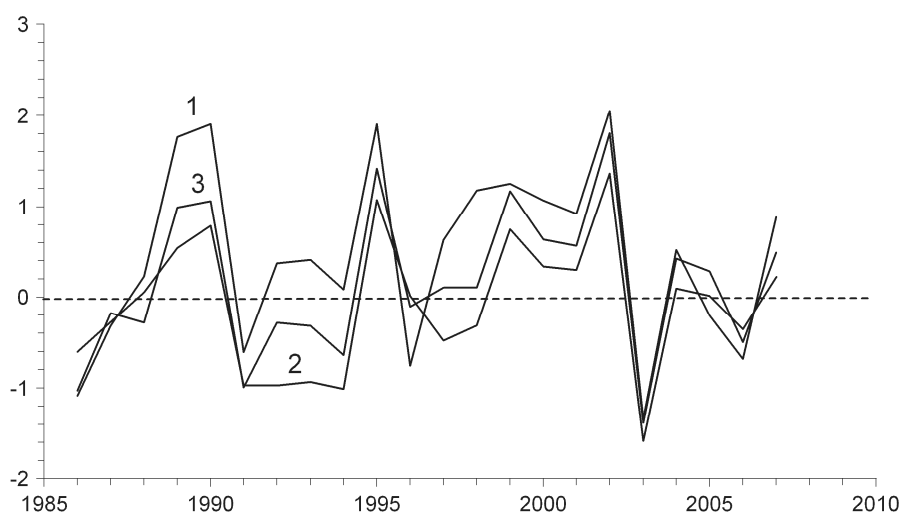
Индекс охлаждения  $S_{\text{хлс}}$  косвенно связан с климатическими значениями солености поверхностного слоя. В результате анализа многолетнего хода солености воды в поверхностном слое моря (рис. 5) обнаруживается ее постепенное снижение в течение последних 50 лет. Это должно приводить к завышению оценок интенсивности обновления ХПС при принятых в приведенной формуле критериях температуры воды. Следует отметить, что отрицательный тренд солености в Черном море  $\sim 0,04\text{‰}$  за десятилетие соответствует отрицательным трендам солености Атлантического и Тихого океанов в умеренных широтах [6], несмотря на региональные отличия формирования солевого баланса.



**Р и с. 5.** Среднемесячные значения солености воды в поверхностном слое западной половины глубоководной части Черного моря (прямая – линейный тренд)

Основными факторами, влияющими на интенсивность плотностной конвекции, являются: охлаждение поверхности моря, вызываемое потоками явного и скрытого тепла; соленость поверхностного слоя; глубина залегания основного пикноклина, зависящая от интенсивности общей циркуляции моря. Показатель суровости зим, количественно выражаемый как сумма градусо-дней мороза, имеет наибольшую корреляцию с температурой ХПС в сравнении с другими факторами [3], он также характеризуется наибольшей межгодовой изменчивостью.

Сравнение термических характеристик вод ХПС (рис. 3, 4) и зимней температуры воздуха (рис. 6) по данным метеорологических станций северного побережья Черного моря за последние 20 лет показывает качественное соответствие знаков их межгодовых аномалий. Существенным отличием является отсутствие положительного тренда температуры воздуха для этого периода (рис. 6), тогда как для температуры ХПС он явно выражен. Более того, количество теплых зим (превышение аномалии среднемесячной температуры воздуха более чем на  $1\sigma$ ) за последние 20 лет уменьшилось в два раза в сравнении с периодом 1960 – 1980 гг. Четко выраженный положительный тренд температуры воздуха, сменившийся в середине 1980-х гг. предшествующий период понижения температуры, длившийся с 1930-х гг., существует только для теплого сезона года, с максимумом в августе. Статистическая связь многолетних изменений зимней температуры воздуха с Североатлантическим колебанием может быть не значима в связи с тем, что по Средиземному и Черному морям проходит граница между областями положительной и отрицательной корреляции температуры поверхности моря и Североатлантического колебания для зимнего сезона [7].



**Р и с. 6.** Нормированные аномалии среднемесячных значений температуры воздуха в феврале по данным метеорологических станций: 1 – Одесса, 2 – Севастополь, 3 – Феодосия

Причиной снижения интенсивности обновления вод ХПС при отсутствии значимых положительных трендов зимней температуры воздуха могут слу-

жить долгопериодные колебания солености, проявляющиеся в последние десятилетия как распреснение поверхностного слоя моря [8, 9]. Это понижает плотность поверхностных вод, в связи с чем необходимо дополнительное охлаждение для сохранения среднего вертикального масштаба зимней конвекции.

Увеличение интенсивности циркуляции моря в принципе должно способствовать развитию зимней конвекции в центрах циклонических круговоротов, так как приводит к подъему пикноклина, уменьшению толщины верхнего квазиоднородного слоя и его осолонению. Для тенденций многолетних изменений интенсивности общей циркуляции моря, которые невозможно определить непосредственными измерениями, в литературе приводятся различные оценки [10, 11]. В связи с недостаточной изученностью данного вопроса связать многолетнюю изменчивость ХПС с общей циркуляцией моря пока затруднительно.

**Заключение.** Оценки интенсивности обновления вод ХПС, полученные по спутниковым данным о температуре поверхности моря в зимний период и по гидрологическим данным о температуре вод в ядре ХПС в течение всего года, в основном совпадают. Это позволяет использовать спутниковую информацию для оценки развития процесса вентиляции вод при отсутствии экспедиционных наблюдений.

Начиная с 1995 г. интенсивность обновления вод ХПС в Черном море в целом ниже климатической нормы, за исключением 2003, 2004, 2006 гг., которые соответствуют среднеклиматическим условиям. В последние 50 лет наблюдается чередование периодов интенсивности вентиляции верхнего слоя моря: в 1950-е гг. – обновление вод ХПС выше климатической нормы, в 1960 – 1970-е гг. – слабое обновление, в 1985 – 1995 гг. – выше нормы, после 1995 г. – слабое обновление.

Основными внешними регуляторами интенсивности обновления вод ХПС служат межгодовые колебания потоков тепла на поверхности моря в зимний период, а также долгопериодные колебания водного баланса и, как следствие, солености моря. Долговременные изменения этих факторов в бассейне Черного моря являются проявлением изменчивости климата в Европско-Атлантическом регионе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Титов В.Б.* Влияние многолетней изменчивости климатических условий на гидрологическую структуру и межгодовые обновления холодного промежуточного слоя в Черном море // *Океанология*. – 2003. – № 2. – С. 176 – 184.
2. *Кривошея В.Г., Овчинников И.М., Скирта А.Ю.* Межгодовая изменчивость обновления холодного промежуточного слоя Черного моря // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря* / Под ред. А.Г. Зацепина, М.В. Флинта. – М.: Наука, 2002. – С. 27 – 39.
3. *Belokopytov V.* Long-Term Variability of Cold Intermediate Layer Renewal Conditions in the Black Sea // *NATO ASI ser.* – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. NATO TU-Black Sea Project Ecosystem Modelling as a Management Tool / Eds. L. Ivanov, T. Oguz. – 1998. – 2/47. – P. 47 – 52.



4. *Белокopyтов В.Н., Шокурова И.Г.* Оценки междесятилетней изменчивости температуры и солености в Черном море в период 1951 – 1995 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2005. – Вып. 12. – С. 12 – 21.
5. <http://podaac.jpl.nasa.gov/>.
6. *Boyer T.P., Antonov J.I., Levitus S. et al.* Linear trends of salinity for the world ocean, 1955 – 1998 // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – 32. – P. L01604.
7. *Hurrell J.W., Kushnir Y., Ottensen G. et al.* An Overview of the North Atlantic Oscillation // *Geophysical Monograph.* – Washington, DC: American Geophysical Union. The North Atlantic Oscillation: climatic significance and environmental impact. – 2003. – 134. – P. 1 – 35.
8. *Полонский А.Б., Ловенкова Е.А.* Тренд температуры и солености деятельного слоя в Черном море во второй половине 20-го века и его причины // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2004. – 40, № 5. – С. 832 – 841.
9. *Полонский А.Б., Ловенкова Е.А.* Долговременные тенденции в изменчивости характеристик пикноклина Черного моря // *Там же.* – 2006. – 42, № 3. – С. 419 – 430.
10. *Полонский А.Б., Шокурова И.Г.* Декадная изменчивость характеристик пикноклина и геострофической циркуляции вод Черного моря в зимний период // *Метеорология и гидрология.* – 2009. – № 4. – С. 75 – 92.
11. *Кныш В.В., Кубряков А.И., Моисеенко В.А. и др.* Тенденции в изменчивости термохалинных и динамических характеристик Черного моря, выявленные по результатам реанализа за период 1985 – 1994 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2008. – Вып. 16. – С. 279 – 290.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: v.belokopytov@gmail.com

Материал поступил  
в редакцию 26.05.09  
После доработки 10.07.09

АНОТАЦІЯ На основі архівних гідрологічних даних, сучасних даних буїв-профілемірів і масиву супутникових даних про температуру поверхні моря оцінюється міжрічна мінливість оновлення вод холодного проміжного шару Чорного моря за останні 20 років. Описується методика оцінки інтенсивності оновлення вод цього шару за даними про температуру поверхні моря в зимовий період без залучення вертикальних профілів температури. Наголошується, що в останні 50 років спостерігається чергування періодів інтенсивності вентиляції верхнього шару моря. Аналізуються зв'язки температури води холодного проміжного шару із зимовою температурою повітря за даними метеорологічних станцій північного побережжя Чорного моря і з солоністю поверхневого шару моря, підкреслюється роль останнього чинника.

ABSTRACT Interannual variability of water renewal of the Black Sea cold intermediate layer during last 20 years is estimated based on the archival and modern oceanographic data, buoys-profilemeters and satellite data on the sea surface temperature. The method of estimating intensity of water renewal in this layer using the data on sea surface temperature in winter (excluding temperature vertical profiles) is described. Alternation of the intensity periods of the sea upper layer ventilation during last 50 years is revealed. Based on the data of meteorological stations on the Black Sea northern coast, analyzed are the relations of water temperature in the cold intermediate layer with air temperature in winter and the surface layer salinity. The role of the latter factor is accentuated.