

*О. И. Козлова*

**О ВОЗМОЖНОМ ВКЛАДЕ АДВЕКЦИИ  
В ФОРМИРОВАНИЕ ХОЛОДНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ  
БАЛТИЙСКОГО МОРЯ**

*Приведены результаты анализа среднеголетних (1952 – 2005 гг.) данных по температуре и солености в Балтийском море, опубликованных Институтом исследований Балтийского моря (Варнемюнде, Германия). Данные осреднялись по месяцам, одноградусным квадрантам и слоям 10-метровой толщины. Оказалось, что на 54% площади моря минимальная температура воды в промежуточном слое на 0,01 – 0,1 °С ниже, чем на поверхности в данном месте в течение года. Это говорит о возможности вклада адвекции в формирование холодного промежуточного слоя Балтики.*

*This article offers the results of an analysis of mean annual (1952 – 2005) data on the temperature and salinity in the Baltic Sea published by the Insti-*



*tute for Baltic Sea Research (Warnemünde, Germany). The data were averaged by months, one-degree quadrants, and 10 meter-thick layers. It was found that, throughout the year, 54 % of the minimum sea water temperatures in the intermediate layer are 0.01–0.1 °C lower than those at the surface of the same spot. It suggests the possibility of advection contributing to the formation of CIL in the Baltic Sea.*

**Ключевые слова:** T, S-анализ, Балтийское море, холодный промежуточный слой.

**Key words:** T, S-analysis, the Baltic Sea, cold intermediate layer.

## Введение

Промежуточные слои различного происхождения формируются во многих крупных стратифицированных водоемах, например в Черном море, Тихом океане [4]. Холодный промежуточный слой (ХПС) Балтийского моря — это сезонное явление; он отчетливо выделяется по своей аномально низкой температуре на глубинах 40–60 м в теплое время года в глубоководных районах моря [2]. Благодаря связи с Атлантическим океаном глубинные воды Балтики в центральной части моря имеют в течение всего года температуру 7–8 °С, поверхностные воды летом прогреваются до 19–22 °С, в то время как в промежуточном слое сохраняется температура 2–4 °С [2]. При всей распространенности формирования промежуточных слоев в крупных стратифицированных водоемах Земли ХПС Балтики уникален: ни в одном другом водоеме не обнаружено холодного промежуточного слоя, воды которого были бы не только холоднее самых холодных вод на поверхности в данном месте (в зимнее время), но еще и имели температуру ниже температуры максимальной плотности (T<sub>md</sub>) [3].

Балтийское море в гидрологическом отношении — достаточно изученная часть Мирового океана. Тем не менее в структуре вод Балтики разными исследователями выделяется иногда два (поверхностный и глубинный), иногда три слоя (поверхностный, переходный и глубинный); в пределах этих зон выделяется от двух до девяти водных масс (типов вод) [2].

Температурные промежуточные слои в зависимости от причин, определяющих их возникновение, могут быть разделены на две большие группы. Первая — промежуточные слои *адвективного происхождения*. В их образовании основную роль играют морские течения, распространяющиеся в океане / морях на промежуточных глубинах. В этом случае преобладающим является горизонтальное движение воды вдоль соответствующих изопикнических поверхностей. По мере продвижения инородные воды вследствие перемешивания с окружающими водами постепенно теряют свои свойства, и происходит выравнивание их характеристик.

Вторая группа — промежуточные слои *конвективного происхождения*. Процесс образования такого ХПС состоит из двух следующих друг за другом этапов [1]. Это зимнее охлаждение поверхностного слоя, определяющее положение нижней границы и температуру холодного слоя, и летний прогрев, от интенсивности которого зависит глубина верхней границы. К концу зимы в результате вертикальной циркуляции по-



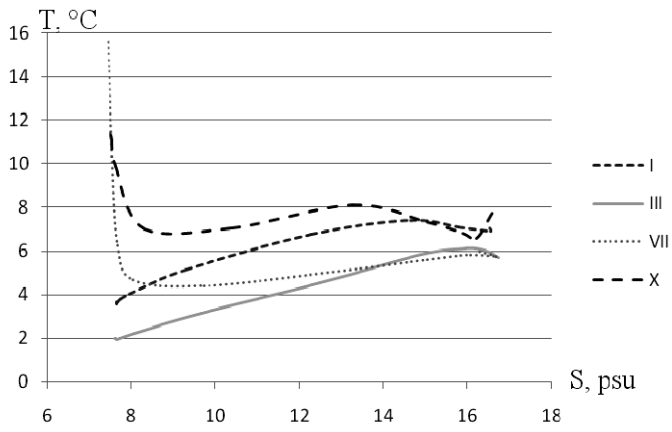
верхностный слой моря становится гомотермичным, а температура его воды — равной минимальной температуре на поверхности. Чем сильнее охлаждение и интенсивнее ветро-волновое перемешивание зимой, тем скорее и тем на большую глубину проникает конвекция. Весной начинается прогрев верхнего слоя. Солнечное тепло, получаемое поверхностью моря, процессами перемешивания передается на глубину. Чем интенсивнее протекает перемешивание, тем быстрее стираются следы зимней вертикальной циркуляции, т.е. тем скорее прогревается охлажденный за зиму слой. Если охлаждение невелико, вертикальная структура вод сравнительно однородна, а перемешивание летом достаточно интенсивно, то к осени следы зимней конвекции могут быть полностью нивелированы. В целом холодные промежуточные слои, образующиеся в результате зимней вертикальной циркуляции и последующего летнего прогрева поверхностного слоя, являются характерной особенностью гидрологической структуры океана [1]. В высоких широтах количества тепла, получаемого поверхностью моря в течение лета, недостаточно для полного стирания результатов охлаждения, поэтому образование холодных промежуточных слоев, сохраняющих температуру поверхности моря в зимний период, особенно типично [1]. Очевидно при этом, что в отличие от ХПС первой группы образование, развитие и исчезновение конвективных ХПС происходит в одном и том же районе.

Цель данной статьи — привести аргументы в пользу адвективного механизма происхождения ХПС Балтийского моря, полученные на основе анализа среднемесячных климатических данных для одноградусных квадрантов [5].

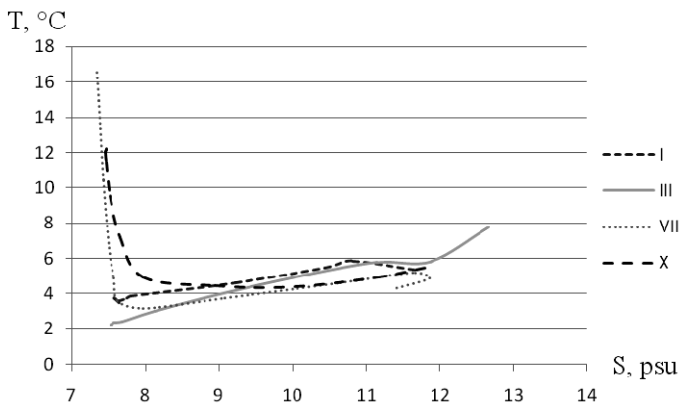
### Массив гидрологических данных и среднемноголетний сезонный ход

Анализируются представленные в климатической базе данные [5], полученные путем осреднения показателей судовых измерений температуры и солености по всей акватории Балтийского моря в течение 1952–2005 гг., осредненных по квадрантам  $1 \times 1^\circ$ , слоям 10 м и месяцам года. Включены также и данные 1900 г. с 6 станций. Суммарное число измерений составляет порядка 4 млн по каждому из параметров.

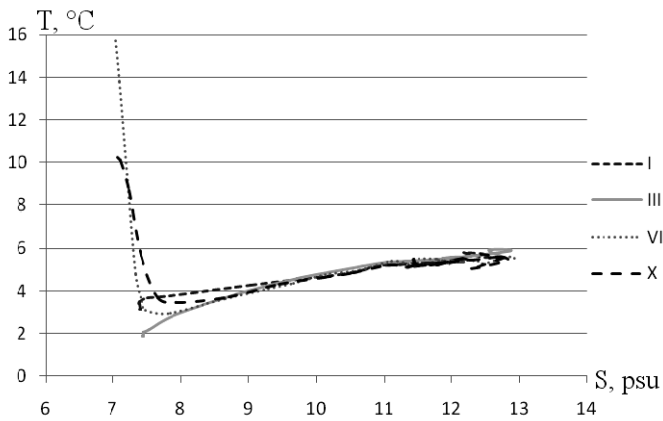
Представление об общей термохалинной структуре вод Балтийского моря и ее сезонных изменениях могут дать среднемесячные климатические T, S-кривые для любого из глубоководных одноградусных квадрантов. На рисунке 1 представлены данные квадрантов, левый нижний угол которых имеет координаты  $15^\circ$  в.д.,  $55^\circ$  с.ш. — Борнхольмская впадина (а),  $19^\circ$  в.д.,  $55^\circ$  с.ш. — Гданьская впадина (б) и  $19^\circ$  в.д.,  $57^\circ$  с.ш. — Готландская впадина (в). Из этих T, S-диаграмм видно, что во всех впадинах Центральной Балтики присутствуют поверхностная и глубинная водные массы, а также холодный промежуточный слой, хорошо идентифицируемый в течение 10 месяцев года и размытый в январе — феврале. Анализ полного массива данных [5] показывает, что ХПС, за исключением мелководий, существует на всей акватории Балтийского моря.



a



б



в

Рис. 1. Среднемесячные T, S-кривые в Борнхольмском бассейне (а), в Гданьской впадине (б), в Готландском бассейне (в). Средние за 1952–2005 гг.: I – январь, III – март, VII – июль, X – октябрь [5]



Цикл возникновения и развития ХПС может быть представлен следующим образом. Вертикальное перемешивание достигает максимальной интенсивности в январе и продолжается до установления минимальных поверхностных температур (март). В это время на мелководьях перемешивание проникает до дна, формируя почти однородный по температуре слой (от  $\sim 2-2,5$  °С на юго-западе моря до  $\sim 0,1-0,5$  °С в Ботническом заливе). При этом в глубоких районах собственно Балтийского моря нижняя граница квазиоднородного слоя «заглубляется» к его центральной части: от 45 м в Борнхольмской и Гданьской котловинах до 65 м в Готландском бассейне. С началом весеннего прогрева процессы перемешивания в центральной части и на мелководье идут по-разному; в глубоких районах — одновременно по всей акватории моря — формируется ХПС. Увеличение глубины залегания сезонного термоклина и возрастание в нем вертикальных градиентов температуры происходит по мере летнего прогрева до достижения на поверхности температурного максимума (август). С началом осенне-зимней конвекции (сентябрь) ХПС размывается, уменьшается по толщине и к декабрю — январю уже практически неразличим. С началом осеннего охлаждения заметно опускание как сезонного термоклина, так и ядра ХПС (т.е. уровня минимума температуры воды), и в октябре — ноябре термоклин и ХПС достигают максимальной глубины (в своем регионе), однако величина вертикальных градиентов температуры при этом уменьшается. С января по март на всей акватории Балтики ХПС размыт.

### Минимальная в течение года температура воды в пределах ХПС

Прямым индикатором, позволяющим различить холодные промежуточные слои конвективного и адвективного происхождения, выступает минимальная в течение года температура воды в их пределах. Если она на поверхности не равна минимальной температуре воды в ядре ХПС, то очевидно, что такой ХПС не является результатом локальной вертикальной конвекции, а его воды принесены в эту точку из другого района.

На рисунке 2 приведены разбросанные по всей акватории моря квадранты, в которых, согласно климатическим среднемесячным данным, минимальная в течение года температура воды в промежуточном слое ниже минимальной температуры воды на поверхности в данном квадранте. Оказалось, что из общего числа 80 квадрантов ( $1 \times 1^\circ$ ) всей акватории Балтийского моря такая ситуация характерна для 43 из них (54%). На рисунке 2 внутри каждого квадранта приведены сами данные в формате «глубина / минимальная температура / месяц» для поверхностного и промежуточного горизонтов. Данные приведены в квадрантах  $1 \times 1^\circ$  в формате D (Т) М, где D — глубина в метрах; Т — минимальная в течение года среднемесячная температура воды на данной глубине; М — месяц, на который она приходится. Построено по среднемесячным данным климатического ряда [5].





промежуточных слоев холоднее локальных поверхностных вод всего на  $0,01 - 0,1$  °С (что все же значимо, поскольку выражает климатическую закономерность), причем вертикальная плотностная стратификация остается всегда устойчивой благодаря влиянию солености.

Таким образом, температура воды в данном случае — трассер процесса, указывающий на неместное происхождение вод промежуточного слоя. Важно и то, что такая ситуация типична для всех районов Балтийского моря и характерна для многих лет, поскольку проявляется даже при многолетнем осреднении.

### Заключение

162

Холодный промежуточный слой является важнейшей чертой гидрологической структуры Балтийского моря. По климатическим данным, наиболее холодные воды в пределах ХПС отмечаются у побережий Балтийского моря и в самом начале его зарождения — в марте. Их температура в это время повсеместно ниже локальной температуры максимальной плотности (зависящей от солености). Присутствие холодных вод очевидно в центре Готландского бассейна к апрелю — в виде прослойки толщиной порядка 10 м; к маю ее мощность достигает 20 м. Поскольку на 54 % площади моря самые холодные воды ядра ХПС в начале его зарождения имеют среднемесячную температуру на  $0,01 - 0,1$  °С ниже, чем минимальная в течение зимы локальная температура воды на поверхности, следовательно, ХПС Балтики хотя бы отчасти адвективного происхождения.

*Работа проводится при поддержке гранта РФФИ № 10-05-00540-а.*

### Список литературы

1. Владимирцев Ю.А. О промежуточных слоях в океане // *Океанология*. 1963. Т. 3, вып. 5. С. 798–805.
2. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Л., 1992. Т. 3: Балтийское море.
3. Козлова О.И. Характеристики холодного промежуточного слоя в центральной части Балтийского моря после зим различной суровости // *Исследовано в России*. 2010. С. 149–158. URL: <http://zhurnal.gpi.ru/articles/2010/010.pdf> (дата обращения: 04.05.2012).
4. Морозов Е.Г., Шука С.А., Голенко Н.Н. и др. Структура температуры в прибрежной зоне Балтийского моря // *Доклады Академии наук*. 2007. Т. 416, №1. С. 115–118.
5. *State and Evolution of the Baltic Sea, 1952–2005. A Detailed 50-year Survey of Meteorology and Climate, Physics, Chemistry, Biology, and Marine Environment* // ed. by R. Feistel [et al.]. Wiley & Sons, 2008.

### Об авторе

Ольга Ивановна Козлова — асп., мл. науч. сотр., Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Калининград.  
E-mail: olga\_may87@mail.ru

### About author

Olga Kozlova, PhD student, Junior Research Fellow, Atlantic Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Kaliningrad.  
E-mail: olga\_may87@mail.ru