

УСЛОВИЯ ПЕРЕХОДА ОТ ДВУХСЛОЙНОЙ К ТРЕХСЛОЙНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ВОД В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ НА ПРИМЕРЕ 2005 ГОДА

О. И. Лобчук^{1*}, А. В. Килесо^{1,2}, Т. В. Буканова¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: olga_may87@mail.ru;

² *Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Россия, Калининград, ул. А. Невского, д. 14,
e-mail: aleksandr.kiles@gmail.com*

На основе данных автоматической буйковой станции Arkona Becken сети MARNET, метеорологических наблюдений и спутниковых данных за 2005 г. проведен анализ условий перехода от двухслойной к трехслойной стратификации в юго-западной части Балтийского моря. Анализ изменения термохалинной структуры вод ранней весной 2005 г. в этом районе показал, что в период максимального охлаждения поверхностных вод в этом году их характеристики варьируют в диапазоне S : 7.5–8.0 и T : 1.4–2.0 °C. Переход от двухслойной к трехслойной стратификации вод в 2005 г. длился 16 дней (с 15 по 30 марта) и сопровождался продолжительными восточными ветрами.

Ключевые слова: Балтийское море, термохалинная структура, холодный промежуточный слой, буйковая станция Arkona Becken сети MARNET, весенний прогрев

Введение

Балтийское море относится к внутриматериковым морям; оно связано с Атлантическим океаном только через узкие мелководные Датские проливы (Большой и Малый Бельт и Зунд) и Северное море (Гидрометеорология и гидрохимия, 1992). Из-за значительной протяженности моря с севера на юг (около 1370 км) (Гидрометеорология и гидрохимия, 1992), через несколько климатических зон его воды формируются при существенно различных внешних условиях. Это приводит к очевидным различиям по солености и температуре между водами отдельных бассейнов моря и, как следствие, к возникновению водообмена между ними и сложной вертикальной стратификации вод (Dutheil et al., 2022).

С наступлением весеннего прогрева и образованием сезонного термоклина в водах Балтийского моря ежегодно формируется холодный промежуточный слой (ХПС), который сохраняется в глубоководной части большую часть года. При мощности порядка 20–30 м (типичные глубины от 20 до 50 м) этот слой имеет сложную структуру как по вертикали, так и по горизонтали: температура и соленость

его вод, положение верхней и нижней границ, а также ядра (минимума температуры воды) непостоянны в пространстве и во времени и отличаются от года к году (Чубаренко, 2010; Chubarenko et al., 2017; Chubarenko, Stepanova, 2018; Лобчук, 2018; Степанова, 2015; Чубаренко и др., 2017). Выполненные исследования позволили выделить ежегодно повторяющиеся структурные элементы и описать сезонную эволюцию ХПС, показали, что ХПС включает следы интрузий и имеет подслои с температурами воды ниже температуры максимальной плотности ($T_{мп}$) (Chubarenko, Demchenko, 2010; Козлова, 2012; Степанова, 2015; Chubarenko et al., 2017; Stepanova, 2017; Chubarenko, Stepanova, 2018; Bagaev et al., 2021; Bukanova et al., 2023). Анализ большого объема экспедиционных данных и исследований доказал, что ХПС – это не просто «старая зимняя вода», оставшаяся между более теплыми слоями (как утверждалось ранее в (Leppäranta and Myrberg, 2009)), а динамичный слой, структура которого развивается в течение сезонного цикла (Stepanova, 2017; Chubarenko, Stepanova, 2018; Stepanova, Mazyuk, 2020).

В работе (Chubarenko, Stepanova, 2018) была выдвинута гипотеза адвективного формирования ядра ХПС в Балтийском море. Согласно этой гипотезе, ядро ХПС образуется в результате весенней интенсификации горизонтального водообмена между бассейнами в пределах моря, вызванного градиентом плотности (солености) в позднезимнем верхнем перемешанном слое. Авторами показано, что в западной части моря в конце марта – начале апреля, в период интенсивного прогрева, прекращается вертикальное перемешивание толщи вод и начинается горизонтальный обмен, переносящий холодную воду (с температурой от 1.5 до 4.0 °C в разные годы) с характерной соленостью (7.5–8.1) с юго-запада моря на северо-восток, в промежуточные слои собственно Балтийского моря (Chubarenko, Stepanova, 2018).

В настоящее время регулярно пополняются массивы данных, свидетельствующие о том, что формирование ХПС Балтийского моря тесно связано с интрузионной активностью. Термохалинные интрузии являются отличительной особенностью Балтийского моря (Chubarenko, Stepanova, 2018). Известны наблюдения интрузий в пределах пикноклина и под ним (Zhurbas, Paка, 1999; Kuzmina et al., 2005), в промежуточных слоях в течение всего года (Степанова и др., 2015; Chubarenko et al., 2017; Holtermann et al., 2020), в верхнем слое и термоклине (Eilola, 1997). Так, в исследовании (Bagaev et al., 2021) представлены наблюдения изопикнических интрузий холодных/соленых вод (с температурой от 1.4–2.0 °C и с характерной соленостью ~7.5–7.8) в промежуточных слоях и верхнем пикноклине в юго-восточной части Балтийского моря весной 2013 г. Показано, что воды интрузий формируются в пределах поверхностного слоя западной части моря в конце марта. Далее, в условиях весеннего прогрева, интенсификация и/или ослабление вертикального перемешивания за счет перехода температуры воды через $T_{мп}$ играет важнейшую роль в изменении режима от вертикального перемешивания к горизонтальному обмену, что приводит к погружению холодных вод с поверхности в промежуточные слои и маркирует начало формирования ядра ХПС. В работе (Bukanova et al., 2023) показаны на примере 2006 г. детали формирования ядра ХПС: холодные поверхностные воды юго-западной части моря, в окрестностях

о. Борнхольм, ранней весной составляют основу ядра ХПС. Также в этой работе впервые введен термин для вод ядра ХПС – Борнхольмские промежуточные воды.

Продолжая многолетние исследования особенностей океанографических условий, складывающихся при начале формирования холодного промежуточного слоя в Балтийском море (Chubarenko, Demchenko, 2008, 2010; Demchenko et al., 2011; Liblik and Lips, 2011; Stepanova et al., 2015; Chubarenko et al., 2017; Лобчук, 2018; Chubarenko, Stepanova, 2018; Stepanova, Mízyuk, 2020; Vagaev et al., 2021; Bukanova et al., 2023), в данной работе поставлена задача выявить условия перехода от двухслойной к трехслойной стратификации вод в юго-западной части Балтийского моря на примере 2005 г. Совместный анализ спутниковых данных, данных автоматической буйковой станции и комплексной метеорологической информации позволили провести детальный анализ и подтвердить, что район формирования вод с минимальной температурой, которые позже составят ядро ХПС, находится в юго-восточной части Балтийского моря.

Материалы и методы

В качестве основного массива экспериментальных данных были использованы полученные по запросу результаты измерений за 2005 г. автоматической буйковой станции Arkona Becken сети MARNET (рисунок 1), поддерживаемой Институтом исследований Балтийского моря в Варнемюнде (IOW), Германия (www.bsh.de).

Автоматическая буйковая станция Arkona Becken (54°53' с. ш., 13°52' в. д.) установлена в Арконском бассейне Балтийского моря; глубина моря в точке постановки составляет 46 м. Буйковая станция общей высотой 16.5 м состоит из двух частей. Верхняя часть диаметром 1 м возвышается над поверхностью моря, нижняя часть диаметром 2.4 м находится под водой. Датчики температуры и электропроводности расположены на глубинах 2, 5, 7, 16, 25, 33, 40 и 43 м. Периодичность измерений данных составляет 1 час. В настоящей статье использовались данные измерений температуры на глубинах 2, 5, 7, 25 и 40 м и солености на 7, 25 и 40 м.

Данные о температуре воздуха (на высоте 2 м над поверхностью), скорости и направлении ветра (средние значения за 10 мин до времени наблюдения на высоте 10–12 м над землей) получены с метеорологической станции «Аркона» (54°41'; 13°26', метеостанция № 10091), расположенной на северной части полуострова Виттов на острове Рюген (Германия) на берегу Балтийского моря (<https://rp5.ru/> (открытые данные, дата обращения: 10.01.2024)). Частота измерений составляет 3 часа.

Температура поверхности моря (ТПМ) получена по данным инфракрасного диапазона радиометров Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) на спутниках Aqua, Terra и Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), на спутнике Suomi NPP, пространственное разрешение 1 км. Уровень обработки 2, программное обеспечение SeaDAS 8.2. Спутниковые данные получены с сайта <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>.

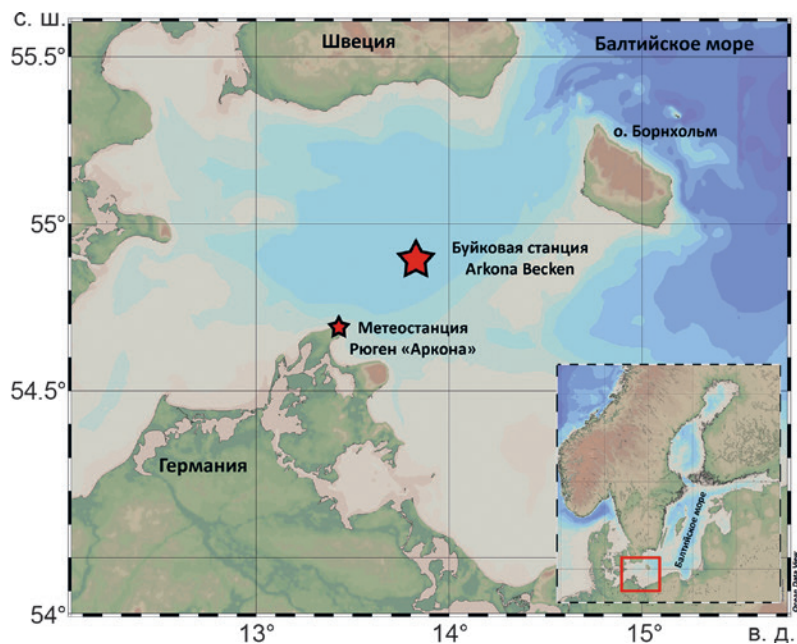


Рис. 1 – Карта Балтийского моря и его юго-западной части с указанием автоматической буйковой станции Arkona Becken сети MARNET и с метеорологической станции «Аркона». Основа для карты взята из программного продукта «Ocean Data View»

Результаты и обсуждение

Анализ метеоусловий

Выбранный для анализа 2005 г. не относится к аномальным (Козлова, 2010). Зима 2004/2005 была умеренно холодной: общая сумма среднесуточных температур ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ за выбранный период в южной Балтике составила всего $32\text{ K}\cdot\text{день}$, при среднемноголетнем (1946–2006 гг.) значении $106\text{ K}\cdot\text{день}$, но с холодным мартом (Nausch et al., 2007). В течение 2004–2005 гг. существенных затоков североморской воды в Балтику не наблюдалось (Lehmann et al., 2022), так что рассматриваемые в статье изменения термохалинной структуры вод обусловлены атмосферными, сезонными и синоптическими процессами внутри суббассейнов Балтийского моря.

Анализ натуральных данных

По данным ежечасных измерений в Арконском бассейне весной 2005 г. (рисунки 2), до 13 марта температура воздуха менялась от отрицательных температур ($-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1 марта) до положительных ($2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 11 марта), что соответствует типичным зимним условиям. Температура воздуха начала расти с 13 марта по 17 марта, ветры в этот период наблюдались северо-восточных и восточных румбов, но 17 марта температура воздуха резко упала до отрицательных значений. Температура воды в этот период на различных горизонтах изменялась незначительно и была меньше или

равной температуре максимальной плотности (для наблюдавшейся солености 7.7, $T_{мп} = 2.3 \text{ }^\circ\text{C}$). Детальный анализ значений температуры воды для горизонтов 2 и 5 м показал (рисунок 2), что на фоне значительного перепада температуры в $13 \text{ }^\circ\text{C}$ между воздухом и поверхностным слоем воды максимальный перепад температуры между слоями воды составил всего $0.22 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура воздуха (17.03.2005) составила $10.0 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура воды на горизонте 2 м составляла $1.66 \text{ }^\circ\text{C}$, на 5 м – $1.88 \text{ }^\circ\text{C}$. Разница плотности между горизонтами равна 0.025 кг/м^3 . При этом самая холодная вода ($1.43 \text{ }^\circ\text{C}$) на горизонте 25 м наблюдалась 25 марта, а на горизонте 40 м – 28 марта ($1.42 \text{ }^\circ\text{C}$).

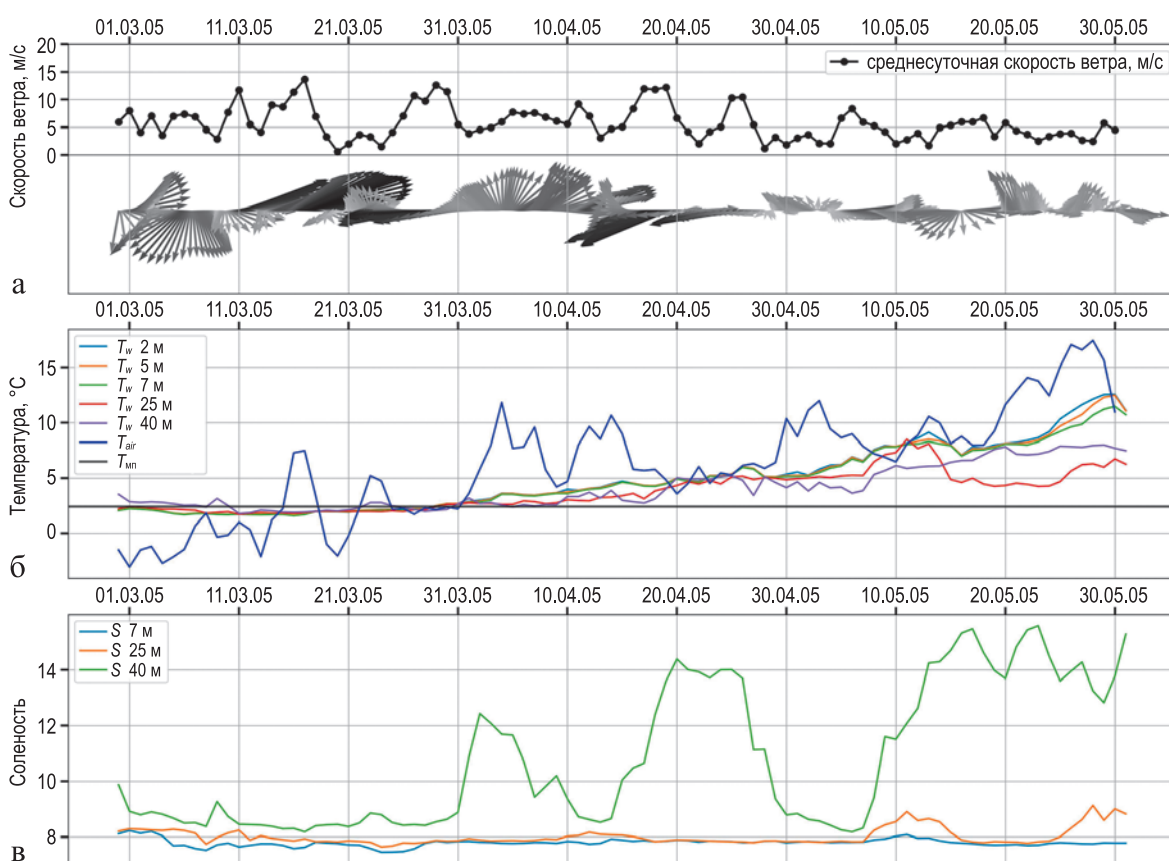


Рис. 2 – Фрагмент данных с буйковой станции Arkonavest с марта по июнь 2005 г.:
а – данные об изменчивости силы и по направлению ветра; **б** – температура воздуха, температура воды на горизонтах 2, 7, 25 и 40 м и температура максимальной плотности ($T_{мп}$) равная $2.3 \text{ }^\circ\text{C}$ при солености 7.7; **в** – соленость на горизонтах 7, 25 и 40 м

В зимний период на этой акватории даже продолжительные ветры со скоростью $10\text{--}15 \text{ м/с}$ слабо перемешивают воды по вертикали, в то время как с приближением весны очевидна общая тенденция уменьшения градиентов температуры / солености / плотности по вертикали. При этом зимние условия обеспечивают фон, на котором вертикальное перемешивание достигает максимальных глубин (практически пикноклина), а развивающийся следом адвективный перенос быстро формирует еще более свежие прослойки, замещая перемешанные по вертикали воды. На этом фоне резкое

снижение температуры воды на горизонтах 25 и 40 м обеспечивается не местной вертикальной конвекцией или ветровым перемешиванием, а наличием горизонтальных интрузий.

Зимой вертикальная стратификация воды имеет типичную структуру для холодного времени года, с верхним квазиоднородным слоем и стратифицированными придонными водами (рисунок 3).

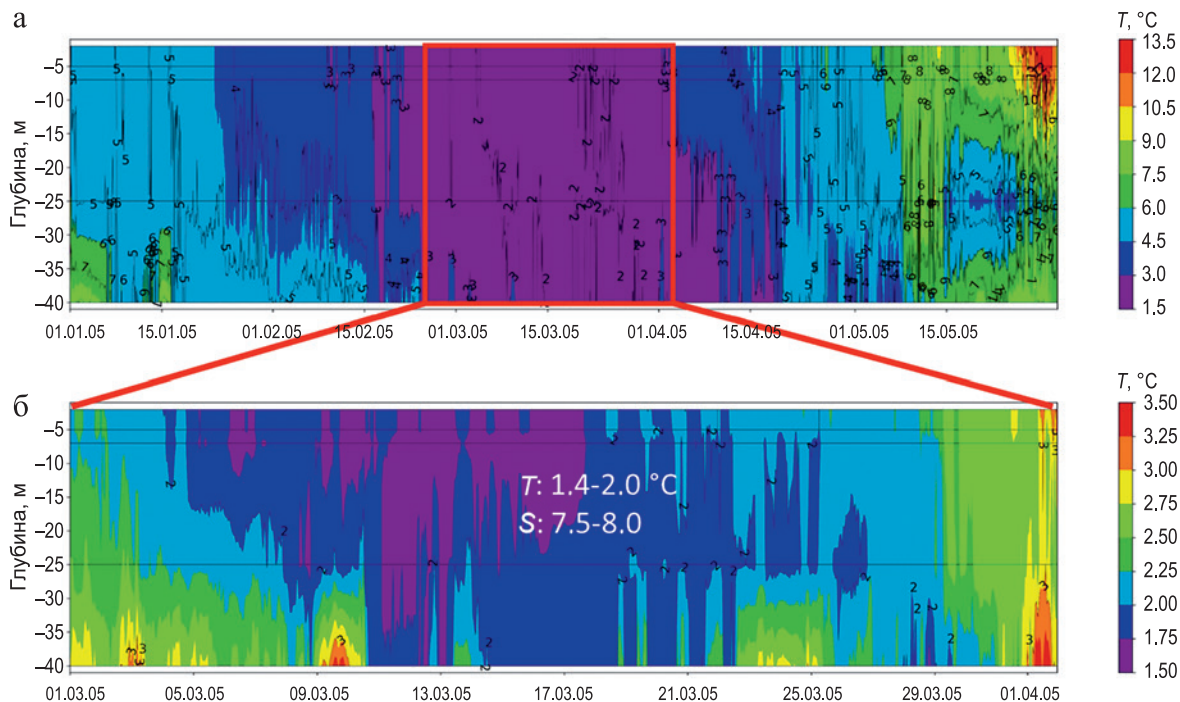


Рис. 3 – Термохалинная структура вод юго-западной части Балтийского моря:
а – температуры воды на станции Arkona Vesken с 1 января по 1 июня 2005 г.;
б – период с 1 марта по 1 апреля показан более подробно.
Данные интерполированы линейно между горизонтами измерений

В марте (15 марта – 30 марта) наблюдается 15-дневный период перемешивания до максимальных глубин (датчик на глубине 40 м). В течение этого периода перемешивания соленность воды во всей толще составляет около 7.5–8.0, а температура воды – 1.4–2.0 °С (т. е. значительно ниже $T_{мп}$ ~2.3 °С, характерной для данной соленности). С 4 апреля 2005 г. вертикальная стратификация восстанавливается довольно быстро, становится типичной для Балтики летом, с теплыми поверхностными и придонными водами и холодным промежуточным слоем между ними. Одновременное появление более теплых вод как в поверхностном, так и в придонном, слоях сопровождается соответствующим понижением/повышением соленности, что доказывает адвективный характер процесса перестройки (см. рисунок 2 и рисунок 3).

В течение марта 2005 г. в интересующем нас районе ТПМ не превышала 2.1 °С, что ниже $T_{мп}$. В первой половине марта температура воздуха опускалась до отрицательных температур и еще 15 марта была значительно ниже $T_{мп}$ (рисунок 4). До 15 марта происходило охлаждение воды ($T < T_{мп}$) с поверхности, что физически соответствует

положительному потоку плавучести в поверхностный слой ($B > 0$) и, следовательно, привело к усилению вертикальной стратификации водной толщи. С 15 марта по 30 марта повышение температуры вод от $T < T_{мп}$ приводило к отрицательному потоку плавучести через поверхность, т. е. к усилению вертикального перемешивания. После 1 апреля температура воды превысила $T_{мп}$, поток плавучести стал положительным (стабилизирующим), поэтому дальнейший прогрев уже способствовал установлению весеннего термоклина.

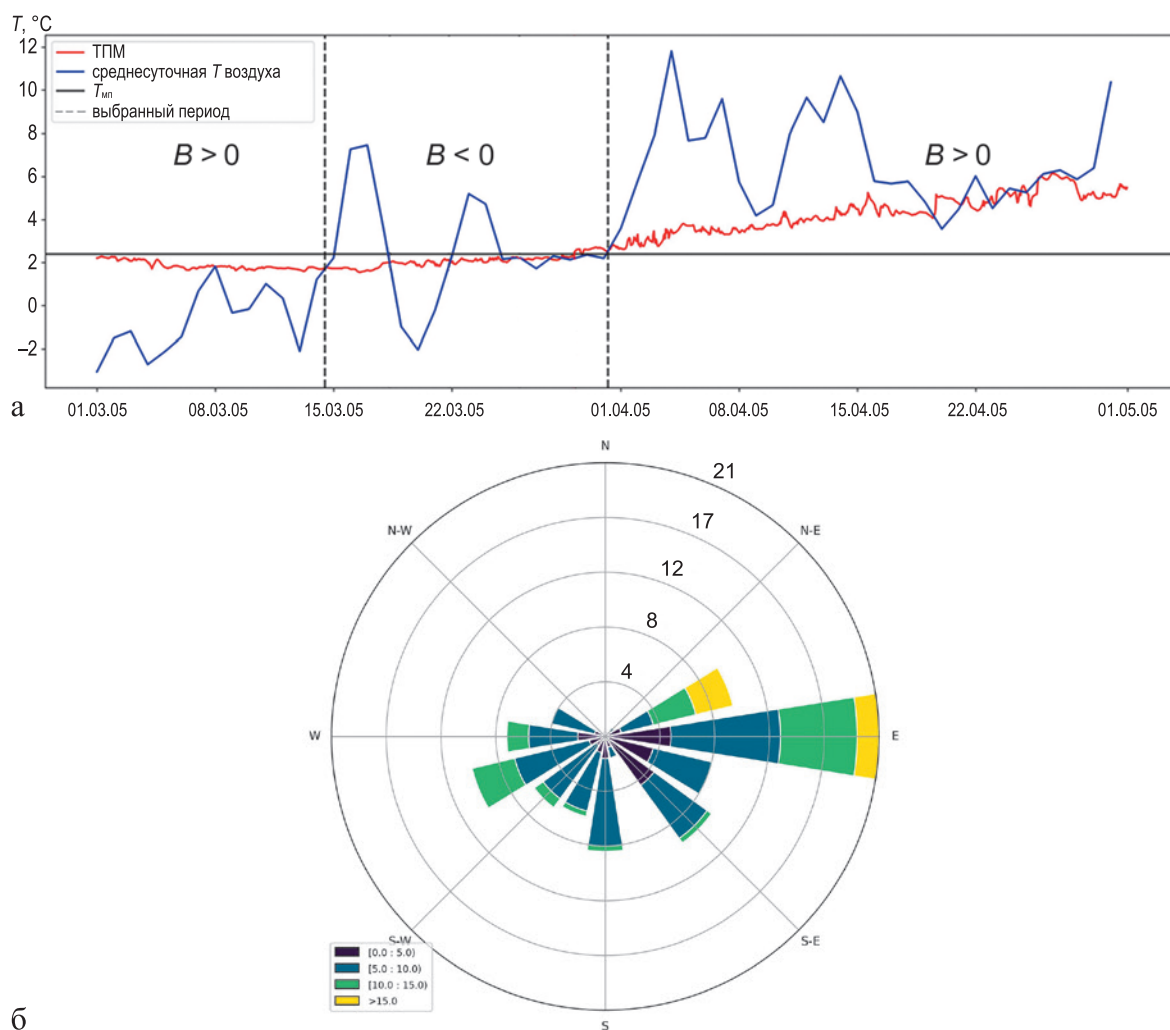


Рис. 4 – Среднесуточная температура воздуха (синяя линия) и температура поверхности моря (ТПМ, красная линия, по MODIS) с 1 марта по 1 мая 2005 г., серой штриховой линией отмечен период с 15 по 30 марта (а); скорость и направление ветра за период с 15 по 30 марта для станции Рёнке «Аркона» (б), цветом показан диапазон скорости ветра

Важно отметить, что период отрицательного (дестабилизирующего) потока плавучести через поверхность – 15–30 марта – протекал в условиях преобладающего восточного ветра (рисунок 4). В рассматриваемом районе он способствует общему переносу поверхностных вод от глубоководных центральных бассейнов Балтийского моря к мелководной юго-западной части, что приводит к накачиванию холодных

поверхностных вод в промежуточные слои и их переносу далее, уже в промежуточных слоях, с запада на восток.

Примечательно, что наблюдается сходство условий, сложившихся ранней весной 2005, 2006 и 2013 годов, о чем сообщается в работах (Bagaev et al., 2021., Bukanova et al., 2023). Во все эти годы переход от двухслойной зимней к трехслойной летней стратификации происходил при преобладании восточных ветров и отрицательных потоках плавучести, обусловленных сезонным солнечным прогревом вод с температурой ниже $T_{мп}$ и близкими по значениям характеристикам температуры и солености.

Заключение

Известно, что общая термохалинная циркуляция Балтийского моря определяется эстуарными механизмами водообмена: более пресные за счет речного стока воды верхнего слоя переносятся в сторону океана, а поступающие более тяжелые (соленые) воды океанического происхождения распространяются в обратном направлении ниже пикноклина. Однако сложная батиметрия Балтийского моря и устье Датских проливов ограничивают обмен вод Балтики с океаном. В результате значительная часть общей циркуляции обуславливается внутренним водообменом собственно балтийских вод, вызываемым разницей их термохалинных характеристик между отдельными бассейнами внутри чаши моря.

Совместный анализ спутниковых данных по ТПМ, данных автоматической буйковой станции и комплексной метеорологической информации позволил провести детальный анализ и выявить условия формирования вод с минимальной температурой (ядра ХПС) в Балтийском море ранней весной 2005 г. В марте–апреле, в условиях весеннего потепления и перед формированием летнего термоклина, в Арконском бассейне произошла смена сезонного цикла термохалинной структуры вод в конкретном регионе – зимняя двухслойная плотностная (соленостная) стратификация эстуарного характера сменилась летней трехслойной термохалинной стратификацией между солеными глубинными водами океанического происхождения и более теплыми/пресными поверхностными водами. Этот процесс перестройки сопровождался усилением горизонтального обмена – одновременной адвекцией более теплых и распресненных вод в верхнем слое и проникновением зимне-холодных поверхностных вод умеренной солености (вод верхнего квазиоднородного слоя) Арконского бассейна в промежуточные слои Балтийского моря. Опираясь на ранее полученные результаты (Степанова и др., 2015; Chubarenko et al., 2017; Лобчук, 2018; Chubarenko, Stepanova, 2018; Stepanova, Mazyuk, 2020; Bagaev et al., 2021; Bukanova et al., 2023), можно заключить, что ключевыми условиями для перехода от зимней к летней стратификации в южной Балтике становятся как наличие устойчивого восточного ветра с соответствующим адвективным переносом, так и отрицательного потока плавучести при достижении температуры максимальной плотности.

Благодарности. Исследования проводятся в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025). Данные получены в рамках программы многолетнего мониторинга IOW. Немецкая часть Программы мониторинга Балтийского моря (COMBINE) и измерения на станциях мониторинга сети MARNET проводятся IOW по поручению Федерального морского и гидрографического агентства (BSH) и финансируются Федеральным министерством транспорта, строительства и жилищно-коммунального хозяйства Германии (BMVBW).

Список литературы

1. Гидрометеорология и гидрохимия шельфовых морей СССР. Том III: Балтийское море. Л.: Гидрометеиздат, 1992. 450 с.
2. Козлова О. И. Характеристики холодного промежуточного слоя в центральной части Балтийского моря после зим различной суровости. В кн.: Исследовано в России. 2010. С. 149–158.
3. Козлова О. И. О возможности вклада адвекции в формирование ХПС Балтийского моря // Вестник БФУ им. И. Канта, 2012. № 7. С. 156–162.
4. Лобчук О. И. Пространственная изменчивость положения границ и мощности холодного промежуточного слоя в Балтийском море в весенний период // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 97–102.
5. Степанова Н. Б., Чубаренко И. П., Щука С. А. Структура и эволюция холодного промежуточного слоя в юго-восточной части Балтийского моря по данным натурных измерений 2004–2008 гг. // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 32–43. <https://doi.org/0.1134/S0001437015010154>.
6. Чубаренко И. П. Горизонтальный конвективный водообмен над подводным склоном: механизм формирования и анализ развития // Океанология. 2010. Т. 50. № 2. С. 184–193.
7. Чубаренко И. П., Демченко Н. Ю., Есюкова Е. Е., Лобчук О. И., Карманов К. В., Пилипчук В. А., Исаченко И. А., Кулешов А. Ф., Чугаевич В. Я., Степанова Н. Б., Кречик В. А., Багаев А. В. Формирование весеннего термоклина в прибрежной зоне юго-восточной Балтики по экспедиционным данным 2010–2013 гг. // Океанология. 2017. Т. 57. № 5. С. 702–709. <https://doi.org/10.1134/S000143701705006X>.
8. Электронный ресурс: <https://www.bsh.de/> (дата обращения 02.10.2014).
9. Электронный ресурс ООО «Расписание Погоды». Расписание погоды. 2005. <https://rp5.ru/> (дата обращения: 10.01.2024).
10. Электронный ресурс: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 17.03.2020).
11. Bagaev A. V., Bukanova T. V., Chubarenko I. P. Spring cold water intrusions as the beginning of the cold intermediate layer formation in the Baltic Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2021. No. 250. 107141. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107141>.
12. Bukanova T., Lobchuk O., Chubarenko I. The Bornholm intermediate waters: Origination, pathway, and detection within the cold intermediate layer of the Baltic Sea // Progress in Oceanography. 2023. No. 210. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102926>.
13. Chubarenko I., Demchenko N. On contribution of horizontal and intra-layer convection to the formation of the Baltic Sea cold intermediate layer // Ocean Sci. 2010. No. 6. P. 285–299. <https://doi.org/10.5194/os-6-285-2010>.

14. *Chubarenko I., Stepanova N.* Cold intermediate layer of the Baltic Sea: Hypothesis of the formation of its core // *Progress in Oceanography*. 2018. No. 167. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2018.06.012>.
15. *Dutheil C., Meier H. E. M., Gröger M., Börgel F.* Warming of Baltic Sea water masses since 1850 // *Climate Dynamics*. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06628-z>.
16. *Eilola K.* Development of a spring thermocline at temperatures below the temperature of maximum density with application to the Baltic Sea // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102. P. 8657–8662.
17. *Holtermann P., Prien R., Naumann M., Umlauf L.* Interleaving of oxygenized intrusions into the Baltic Sea redoxcline // *Limnol. Oceanogr.* 2020. No. 65. P. 482–503. <https://doi.org/10.1002/lno.11317>.
18. *Kuzmina N., Rudels B., Stipa T., Zhurbas V.* The structure and driving mechanisms of the Baltic intrusions // *J. Phys. Oceanogr.* 2005. No. 35. P. 1120–1137.
19. *Lehmann A., Myrberg K., Post P., Chubarenko I., Dailidienė I., Hinrichsen H.-H., Hüseyin K., Liblik T., Meier H. E. M., Lips U., Bukkanova T.* Salinity dynamics of the Baltic Sea // *Earth Syst. Dynam.* 2022. No. 13. P. 373–392. <https://doi.org/10.5194/esd-13-373-2022>.
20. *Leppäranta M., Myrberg K.* *Physical Oceanography of the Baltic Sea* // Springer Berlin Heidelberg. 2009. 423 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-79703-6>.
21. *Meier H. E. M.* Modeling the pathways and ages of inflowing salt- and freshwater in the Baltic Sea // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2007. No. 74. P. 610–627.
22. *Nausch G., Feistel R., Lass H. U., Nagel K., Siegel H.* Hydrographisch chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2006. *Meereswiss. Ber., Warnemünde* 70. 2007. <https://doi.org/10.12754/msr-2007-0070>.
23. *Stepanova N. B.* Vertical structure and seasonal evolution of the cold intermediate layer in the Baltic Proper // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2017. 195. P. 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.05.011>.
24. *Stepanova N., Mizyuk A.* Tracking the formation of the gradient part of the southeastern Baltic Sea cold intermediate layer // *Russ. J. Earth Sci.* 2020. No. 20. ES3005. <https://doi.org/10.2205/2020ES000700>.
25. *Zhurbas V., Paka V.* What drives thermohaline intrusions in the Baltic Sea? // *J. Mar. Sys.* 1999. No. 2. Vol. 1–4. P. 229–241.

Статья поступила в редакцию 11.07.2024, одобрена к печати 27.09.2024.

Для цитирования: Лобчук О. И., Килесо А. В., Буканова Т. В. Условия перехода от двухслойной к трехслойной стратификации вод в юго-западной части Балтийского моря на примере 2005 года // *Океанологические исследования*. 2024. № 52 (3). С. 21–33. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52\(3\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52(3).2).

CONDITIONS FOR THE TRANSITION FROM TWO-LAYER TO THREE-LAYER WATER STRATIFICATION IN THE SOUTHWESTERN PART OF THE BALTIC SEA ON THE EXAMPLE OF 2005

O. I. Lobchuk^{1*}, A. V. Kileso^{1,2}, T. V. Bukanova¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
*e-mail: olga_may87@mail.ru;

² Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, Nevskogo str., Kaliningrad, 236022, Russia,
aleksandr.kileso@gmail.com

A study was conducted based on data from the MARNET automatic buoy station Arkona Becken, meteorological observations for 2005 and satellite data, with the aim of analysing the conditions of the transition from two-layer to three-layer stratification in the southwestern part of the Baltic Sea. As the southwestern part of the sea is the source region of the Cold Intermediate Layer (CIL) core waters, the thermohaline structure of the waters in this area in early spring is of particular importance for determining the properties of the CIL core waters throughout the year. The analysis of the thermohaline structure of the waters in this area in the early spring of 2005 revealed that during the period of maximum cooling of the surface waters, their characteristics exhibited a range of values for salinity (S) between 7.5 and 8.0 and for temperature (T) between 1.4 and 2.0 degrees Celsius. The transition from two-layer to three-layer water stratification lasted for 16 days (from 15 to 30 March) and was accompanied by prolonged easterly winds.

Keywords: Baltic Sea, thermohaline structure, cold intermediate layer, MARNET station Arkona Becken, spring warming

Acknowledgments: The research is conducted in accordance with the terms of the state assignment of the IOW RAS (theme No. FMWE-2024-0025). The data were obtained as part of the IOW multi-year monitoring programme. The German component of the Baltic Sea Monitoring Programme (COMBINE) and measurements at MARNET monitoring stations are conducted by IOW on behalf of the Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH) and financed by the German Federal Ministry of Transport, Building and Housing (BMVBW).

References

1. Bagaev, A. V., T. V. Bukanova, and I. P. Chubarenko, 2021: Spring cold water intrusions as the beginning of the cold intermediate layer formation in the Baltic sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **250**, 107141, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107141>.
2. Bukanova, T., O. Lobchuk, and I. Chubarenko, 2023: The Bornholm intermediate waters: Origination, pathway, and detection within the cold intermediate layer of the Baltic Sea. *Progress in Oceanography*, **210**, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102926>.
3. Chubarenko, I., 2010: *Horizontal convection above underwater slopes*. Kaliningrad, Terra Baltica, ISBN-978-5-98777-050-4.

4. Chubarenko, I. and N. Demchenko, 2010: On contribution of horizontal and intra-layer convection to the formation of the Baltic Sea cold intermediate layer. *Ocean Sci.*, **6**, 285–299, <https://doi.org/10.5194/os-6-285-2010>.
5. Chubarenko, I. and N. Stepanova, 2018: Cold intermediate layer of the Baltic Sea: Hypothesis of the formation of its core. *Progress in Oceanography*, **167**, 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.06.012>.
6. Chubarenko, I. P., N. Yu. Demchenko, E. E. Esiukova, O. I. Lobchuk, K. V. Karmanov, V. A. Pilipchuk, I. A. Isachenko, A. F. Kuleshov, V. Ya. Chugaevich, N. B. Stepanova, V. A. Krechik, and A. V. Bagaev, 2017: Spring thermocline formation in the coastal zone of the southeastern Baltic Sea based on field data in 2010–2013. *Oceanology*, **57**, 632–638, <https://doi.org/10.1134/S000143701705006X>.
7. Chubarenko, I. P., O. I. Kozlova, and N. B. Stepanova, 2011: Mechanisms of seasonal restructuring of the thermohaline structure of waters in the Russian sector of the SEB. *Physical problems of ecology (environmental physics). Sat. scientific works*. Ed. V. I. Trukhin, Yu. A. Pirogov, K. N. Pokazeev, Moscow, MAX Press, **17**, 475–486.
8. Duthel, C., H. E. M. Meier, M. Gröger, and F. Börgel, 2022: Warming of Baltic Sea water masses since 1850. *Climate Dynamics*, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06628-z>.
9. Eilola, K., 1997: Development of a spring thermocline at temperatures below the temperature of maximum density with application to the Baltic Sea. *J. Geophys. Res.*, **102** (C4), 8657–8662.
10. Electronic resource: <https://www.bsh.de/> (accessed 02.10.2014).
11. Electronic resource: <https://rp5.ru/> (accessed: 10.01.2024).
12. *Gidrometeorologiya i gidrohimiya shel' fovyh morej SSSR*, 1992, Vol. III: Baltic Sea. Leningrad, Gidrometeoizdat, 450 p.
13. Holtermann, P., R. Prien, M. Naumann, and L. Umlauf, 2020: Interleaving of oxygenized intrusions into the Baltic Sea redoxcline. *Limnol. Oceanogr.*, **65**, 482–503, <https://doi.org/10.1002/lno.11317>.
14. Kozlova, O., 2010: *Characteristics of the cold intermediate layer in the central part of the Baltic Sea after winters of varying severity. Researched in Russia*, 149–158.
15. Kozlova, O., 2012: On the possibility of the contribution of advection to the formation of the CIL in the Baltic Sea. *Bulletin of the IKBFU*. I. Kant, **7**, 156–162.
16. Kuzmina, N., B. Rudels, T. Stipa, and V. Zhurbas, 2005: The structure and driving mechanisms of the Baltic intrusions. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 1120–1137.
17. Lehmann, A., K. Myrberg, P. Post, I. Chubarenko, I. Dailidienė, H.-H. Hinrichsen, K. Hüsey, T. Liblik, H. E. M. Meier, U. Lips, and T. Bukanova, 2022: *Salinity dynamics of the Baltic Sea*. *Earth Syst. Dynam.*, **13**, 373–392, <https://doi.org/10.5194/esd-13-373-2022>.
18. Leppäranta, M. and K. Myrberg, 2009: *Physical Oceanography of the Baltic Sea*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-79703-6>.
19. Lobchuk, O., 2018: Spatial variability of the location of boundaries and the thickness of the cold intermediate layer in the Baltic sea in spring. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, **53**, 97–102.
20. Meier, H. E. M., 2007: Modeling the pathways and ages of inflowing salt – and freshwater in the Baltic Sea. *Estuar. Coast. Shelf Science*, **74**, 610–627.
21. Nausch, G., R. Feistel, H. U. Lass, K. Nagel, and H. Siegel, 2007: *Hydrographisch chemische Zustandseinschätzung der Ostsee* 2006. Meereswiss. Ber., Warnemünde **70**, <https://doi.org/10.12754/msr-2007-0070>.
22. Stepanova, N. and A. Mazyuk, 2020: Tracking the formation of the gradient part of the southeastern Baltic Sea cold intermediate layer. *Russ. J. Earth Sci.*, **20**, ES3005, <https://doi.org/10.2205/2020ES000700>.

23. Stepanova, N. B., 2017: Vertical structure and seasonal evolution of the cold intermediate layer in the Baltic Proper. *Estuar. Coast. Shelf Science*, **195**, 34–40, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.05.011>.
24. Stepanova, N. B., I. P. Chubarenko, and S. A. Shchuka, 2015: Structure and evolution of the cold intermediate layer in the southeastern part of the Baltic Sea by the field measurement data of 2004–2008. *Oceanology*, **55**, 25–35, <https://doi.org/10.1134/S0001437015010154>.
25. Zhurbas, V. and V. Paka, 1999: What drives thermohaline intrusions in the Baltic Sea? *J. Mar. Sys.*, **2** (1–4), 229–241.

Submitted 11.07.2024, accepted 27.09.2024.

For citation: Lobchuk, O. I., A. V. Kileso, and T. V. Bukanova, 2024: Conditions for the transition from two-layer to three-layer water stratification in the southwestern part of the Baltic Sea on the example of 2005. *Journal of Oceanological Research*, **52** (3), 21–33, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52\(3\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52(3).2).