

УДК 551.465.63+551.508

ОСОБЕННОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ЧЁРНОГО МОРЯ ВО ВРЕМЯ ХОЛОДНОГО ВТОРЖЕНИЯ

А. А. Сизов*, Т. М. Баянкина

Представлено академиком РАН В.М. Котляковым 13.11.2017 г.

Поступило 07.12.2017 г.

Использование результатов дрейферных наблюдений в западной части Чёрного моря позволило показать, что при зимних холодных вторжениях (ХВ), сопровождающихся ветром 10 м/с и более верхний квазиоднородный слой (ВКС) выхолаживается на 0,1–0,2 °С в течение суток. При этом сезонный термоклин (СТ) и холодный промежуточный слой (ХПС) заглубляются, а после прекращения ХВ эти слои поднимаются на меньшие глубины, создавая пониженную температуру ВКС и повышенную по сравнению с периодом до ХВ температуру в слое под СТ. Этот процесс перемешивания верхнего слоя моря объясняется участием в нем антициклонических мезомасштабных вихрей.

Ключевые слова: холодное вторжение, верхний квазиоднородный слой, холодный промежуточный слой.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524874443-447>

Верхний слой Чёрного моря в силу своей небольшой толщины весьма чувствителен к изменениям атмосферного воздействия (атмосферного форсинга). Особенно сильная изменчивость теплового состояния верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) моря наблюдается в зимний сезон, когда формируются значительные пространственные положительные или отрицательные аномалии температуры его поверхности (ТПМ). Исследованиями [1–4] показано, что существует тесная связь ТПМ Чёрного моря и температуры воздуха в зимний период. По оценке [1] в течение последних 130 лет наблюдалось чередование тёплых и холодных зим, когда температуры воздуха и воды достигали экстремально низких или высоких значений. В [5] эти экстремальные состояния ТПМ связывались с особенностями циркуляции атмосферы в Атлантико-Европейском секторе, которые характеризуются индексом Североатлантического колебания (САК), изменяющегося в широком диапазоне масштабов [6, 7]. В настоящее время остаются невыясненными некоторые особенности механизма выхолаживания ВКС и обновления холодного промежуточного слоя (ХПС) моря. Известные оценки зимней конвекции [8] не позволяют объяснить отдельные структурные аномалии процесса перемешивания в деятельном слое моря.

Целью настоящей работы является исследование процесса формирования температуры деятельного

слоя моря в условиях холодных вторжений (ХВ) на его акваторию с использованием технологии дрейферных измерений.

Для исследования были использованы данные: зимний индекс САК (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>); ежедневные метеорологические данные (атмосферное давление, температура воздуха, скорость и направление ветра) по метеостанциям Черноморское и Стамбул в основные синоптические сроки; ежедневные измерения (атмосферное давление, температура морской воды от 0,2 до 80 м) по данным дрейферов Морского гидрофизического института (МГИ) типа SVP-BTC80 № 249940 (2012 г.) и № 248990 (2014 г.) [9]; синоптические карты (<http://www.met.fu-berlin.de/de/wetter/maps/>) и спутниковые изображения облачности с ИСЗ “Meteosat” (<http://www.sat.dundee.ac.uk/geobrowse/>). Анализ метеорологических и дрейферных измерений показал, что ХВ на акваторию Чёрного моря чаще всего происходят в зимы с высокими значениями индекса САК. По данным дрейферных измерений [9] были выбраны два случая, представляющие изменчивость температуры воды в слое от 0,2 до 80 м при ХВ. Эти случаи отличались по интенсивности атмосферного форсинга.

В первом случае, в период с 1 января по 10 февраля 2014 г., дрейфер SVP-BTC80 № 248990 находился в западной части Чёрного моря в южной ветви Основного черноморского течения (ОЧТ). По данным температуры воздуха и атмосферного давления отмечались условия экстремального ХВ.

Морской гидрофизический институт
Российской Академии наук, Севастополь
*E-mail: Sizov_Anatoliy@mail.ru

Во втором случае дрейфтер SVP-BTC80 № 249940 в период с 14 по 31 декабря 2012 г. находился в западной части моря в северной ветви ОЧТ. В этом случае наблюдались условия более слабого ХВ. Траектории дрейфтеров показаны на рис. 1.

Считалось, что экстремальное ХВ начиналось при $P \geq 1025$ гПа, $T_a \leq -10$ °С и $V \geq 10$ м/с. Метеорологические условия в черноморском регионе в период с 1 января по 10 февраля 2014 г. определялись по наблюдениям на метеостанции Черноморское (западное побережье Крыма). Идентификация ХВ проводилась также по картам приземного анализа и материалам спутниковой облачности. Анализ синоптических карт и спутниковых изображений облачности показал, что 18.01.2014 г. над Скандинавским полуостровом сформировался антициклон с атмосферным давлением 1035 гПа, который распространялся по европейской территории России (ЕТР). К моменту выхода на Чёрное море (29.01.2014 г.) он усилился до 1045–1050 гПа. Датчики, установленные на дрейфтере (термокоса), позволили получить данные температуры моря с хорошим разрешением по времени (1 ч) и по глубине от 0,2 до 80 м (через каждые 5 м) и проследить особенности изменчивости температуры в верхнем слое моря. Для решения поставленной задачи использовались среднесуточные дрейфтерные данные (рис. 2). На рис. 2а видно, что ХВ на Чёрное море началось 29.01.2014 г., на станции Черноморское зафиксированы температура воздуха $-6,5$ °С, атмосферное давление 1014 гПа, скорость ветра 12–15 м/с северо-восточного направления. Холодные вторжения на акваторию моря по метеорологическим характеристикам достигло своего максимума 31.01 и 01.02.2014 г. В этот период температура воздуха опускалась до $-14,9$ °С, ветер северо-восточного направления уменьшился до 12–13 м/с. В последу-

ющие дни атмосферный форсинг стал ослабевать и к 07.02.2014 г. температура воздуха поднялась до 0 °С, скорость ветра снизилась до 3–5 м/с. Изменчивость атмосферного форсинга у северной и южной границ западной части моря обусловила синхронную и синфазную реакцию температуры верхнего слоя моря, зафиксированную на дрейфтере. На рис. 2б показано положение изотермы 8,5 °С, которая в среднем соответствовала нижней границе ВКС (верхней границе сезонного термоклина — СТ), и изотермы 8,1 °С, ограничивающей холодный промежуточный слой (ХПС). Хорошо видно, что вторжение холодного воздуха на тёплую акваторию моря (ТПМ в районе дрейфтера была 9,1 °С) при скорости ветра, превышающей 10 м/с, привело к быстрому выхолаживанию ВКС (рис. 2в). Быстрое понижение средней температуры ВКС (на 0,13 °С) в течение одних суток (с 29 на 30 и с 30 на 31.01) объясняется механизмом плотностной конвекции [8]. Но надо учитывать, что при таких скоростях ветра процесс перемешивания может осуществляться также за счёт спиральной циркуляции в вихрях Ленгмюра [8] и с участием синоптических и мезомасштабных вихрей [4]. В рассматриваемой конкретной ситуации более заметная роль в процессе перемешивания принадлежит, по-видимому, механизму вертикального обмена в мезомасштабных вихрях. Как хорошо видно на рис. 2б, в быстрое выхолаживание ВКС, которое произошло с 30 на 31.01.2014 г., сопровождалось заглублением изотерм. Причём нижняя граница ХПС — изотерма 8,0 °С (не показанная здесь) — ушла на глубину, превышающую 80 м. После прекращения вторжения холодного воздуха ХПС вместе с сезонным термоклином поднимались к поверхности до глубин меньших, чем они занимали до начала ХВ. Произошло уменьшение глубины верхней границы СТ, а средняя температура

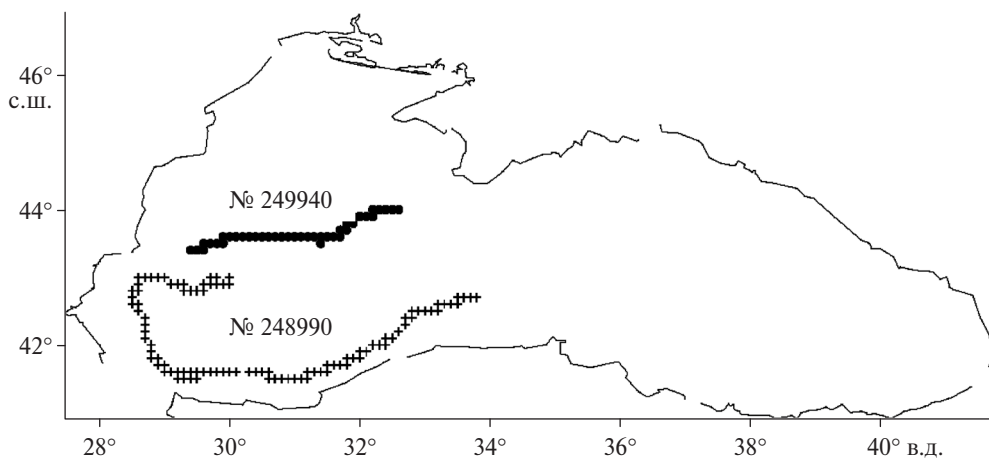


Рис. 1. Траектория дрейфтеров SVP-BTC80: № 249940 в период 14–31.12.2012 г.; № 248990 в период 01.01–10.02.2014 г.

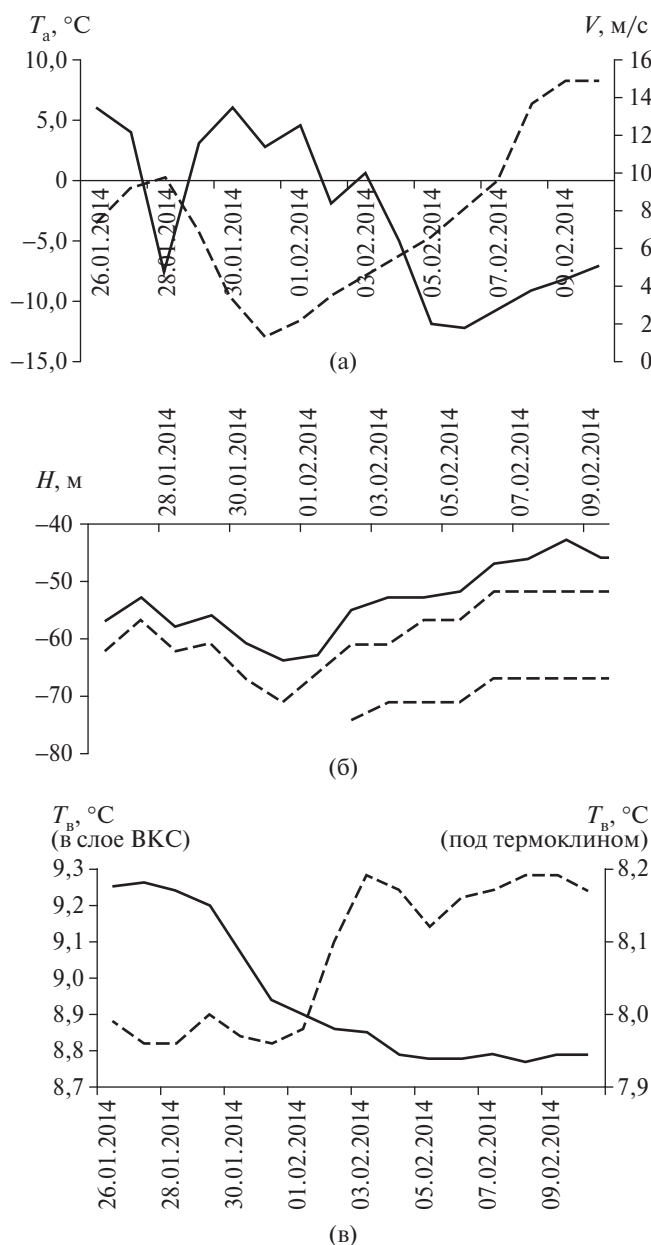


Рис. 2. Изменчивость температуры верхнего слоя Чёрного моря в период экстремального ХВ (26.01–10.02.2014 г.): (а) — скорость ветра (м/с) — сплошная линия; температура воздуха (°C) — пунктирная линия; (б) — положение изотерм на глубинах (H , м) по измерениям на дрейфере: сплошная линия — 8,5 °C; пунктирная линия — 8,1 °C; (в) — средняя температура воды: сплошная линия — в слое ВКС; пунктирная линия — под сезонным термоклином (СТ).

ВКС понизилась (рис. 2б, в). На рис. 2в показано, что средняя температура слоя, расположенного ниже СТ, после прекращения холодного вторжения повысилась. Известно, что под СТ располагается основной термоклин [4], температура в котором выше, чем в ХПС. Поэтому повышение средней температуры в слое, лежащем ниже СТ и ХПС, может быть

связано только с подъёмом вод основного термоклина, что и показывает уменьшение глубины положения изотерм на рис. 2б.

Деформация изотермических поверхностей, показанная на рис. 2, связана, по-видимому, с процессами в мезомасштабных вихрях, в частности в вихрях инерционного масштаба. Эти вихри возникают под воздействием ветра и существуют в среднем в течение 2–3 сут [4]. Учитывая, что на материковом склоне Чёрного моря сосредоточены в основном антициклонические вихри [4], заглубление изотерм при возрастании скорости ветра (рис. 2б) можно объяснить действием механизма циркуляции в антициклонических круговоротах. Известно, что сезонный пикноклин в Чёрном море возникает как следствие сезонного термоклина [4]. Поэтому результат, показанный на рис. 2б, может означать, что антициклонический круговорот увлекает на глубину воды меньшей плотности по сравнению с окружающей водной массой. Грубая оценка показывает, что скорость опускания изотерм, ограничивающих сезонный термоклин и ХПС, равна ~5 м/сут. Примерно с такой же скоростью происходил подъём изотерм после прекращения холодного вторжения (ослабления ветра). Предположительно подъём изотерм восстанавливал геострофический баланс, изотермические поверхности возвращались на “свои” горизонты. Ослабление антициклонического круговорота порождает процесс гидростатического приспособления, в результате которого происходит восстановление геострофического баланса. Этот процесс реализуется в форме апвеллинга. Подтверждением выше изложенной ситуации может служить пример дрейфера № 249940, который находился с 14 по 31 декабря 2012 г. в северной ветви ОЧТ западной части Чёрного моря. В этот период холодная воздушная масса, которая сместилась на акваторию моря, имела более высокую температуру, чем в 2014 г. Поверхностная температура моря в районе дрейфера и температура воздуха на метеостанции Черноморское в период ХВ в декабре 2012 г. были выше (9,9 и –3,0 °C соответственно). Не воспроизводя рисунки, иллюстрирующие процесс ХВ средней интенсивности, отметим, что они показывают основные особенности заглубления СТ и ХПС во время ХВ. Как в южной, так и в северной частях моря после завершения процесса ХВ произошло значительное понижение средней температуры ВКС. Безусловно, в первую очередь это результат выхолаживания поверхностного слоя моря за счёт возрастания теплоотдачи в атмосферу. Но в то же время значительное понижение средней температуры ВКС происходило после прекращения холодного вторжения,

когда начал развиваться процесс гидростатического приспособления. Это могло означать, что выхолаживание ВКС происходило с участием глубинных вод. Если это так, то после разрушения антициклонического круговорота в верхнем слое моря должен оставаться его след в виде отрицательной аномалии температуры воды. Для большей наглядности описанных выше процессов быстрого (импульсного) выхолаживания ВКС в табл. 1 приведены основные характеристики деятельного слоя моря при ХВ различной интенсивности.

В табл. 1 показано состояние до ХВ (26.01.2014 г. и 15.12.2012 г.), 31.01.2014 г. и 20.12.2012 г. — в момент ХВ, 04.02.2014 г. и 22.12.2012 г. — после прекращения ХВ. Общим для обоих случаев является заглубление ВКС в момент ХВ на акваторию моря и возвращение верхней границы СТ на меньшие глубины после прекращения ХВ. Как показано в таблице, средняя температура ВКС во время экстремального (2014 г.) и среднего по интенсивности (2012 г.) ХВ уменьшалась примерно с одинаковой скоростью (0,05–0,06 °C в сут). После прекращения экстремального ХВ (2014 г.) выхолаживание ВКС проходило примерно в 2 раза медленнее, чем в случае вторжения средней интенсивности (2012 г.). Повидимому, это связано с тем, что водная масса, располагавшаяся под термоклином до и во время ХВ в декабре 2012 г., была на 0,8–0,9 °C холоднее, чем в январе, феврале 2014 г.

Таким образом, результаты исследования показали, что зимнее выхолаживание деятельного слоя Чёрного моря происходит при участии ХВ различной интенсивности. Установлено, что при ХВ экстремальной и средней интенсивности температура ВКС понижалась за одни сутки на 0,13 °C в 2014 г. и на 0,37 °C в 2012 г. Если считать, что скорость выхолаживания ВКС с участием антициклонических ме-

Таблица 1. Основные характеристики деятельного слоя моря при экстремальном и средней интенсивности ХВ

Дата	Ст. Черноморское		$T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$ (в слое ВКС)	$T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$ (под термоклином)	H , м ВКС
	V , м/с	$T_{\text{а}}, ^\circ\text{C}$			
Дрифтер № 248990					
26.01.2014	13,4	−3,4	9,25	7,99	62
31.01.2014	11,4	−12,9	8,94	7,96	64
04.02.2014	6,5	−6,2	8,79	8,17	53
Дрифтер № 249940					
15.12.2012	4,8	−1,95	9,92	7,17	29
20.12.2012	11,6	−4,54	9,65	7,03	50
22.12.2012	4,0	−6,24	9,36	7,10	35

зомасштабных вихрей в 2012 г. характерна для северной ветви ОЧТ в западной части Чёрного моря (район интенсивного обновления ХПС [4]), то можно ожидать, что для обновления ХПС (понижения температуры ВКС до 7–8 °C) будет достаточно 6–8 холодных вторжений в течение декабря–февраля. Следовательно, механизм быстрого (импульсного) выхолаживания ВКС и понижения температуры ХПС (накопления холодозапаса в нем) является весьма реальным процессом.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827–2014–0011 “Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий” (шифр “Оперативная океанография”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титов В.Б. Межгодовое обновление холодного промежуточного слоя Черного моря за последние 130 лет // Метеорология и гидрология. 2003. № 10. С. 68–75.
2. Kazmin A.S., Zatsepin A.G. Long-Term Variability of Surface Temperature in the Black Sea, and Its Connection with Large-Scale Atmospheric Forcing // J. Mar. Syst. 2007. V. 68. P. 239–301.
3. Пиотух В.Б., Зацепин А.Г., Кузьмин А.С. и др. Оценка влияния зимнего атмосферного форсинга на изменчивость термохалинных характеристик деятельного слоя Черного моря // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из Космоса. 2009. В. 6. Т. 1. С. 442–450.
4. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: НАН Украины/Морской гидрофиз. ин-т, 2011. 212 с.
5. Сизов А.А., Чехлан А.Е. Аномалии гидрометеорологических полей в районе Черного моря, связанные с градиентами температуры поверхности воды в Северной Атлантике // Метеорология и гидрология. 2010. № 7. С. 65–74.
6. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада ЛТД, 2013. 144 с.
7. Малинин В.Е., Гордеева С.Н. Североатлантическое колебание и увлажнение европейской территории России // Terra Humana. 2014. № 2. С. 192–198.
8. Конвективное перемешивание в море / Под ред. А.Д. Добровольского. М.: Изд-во МГУ, 1977. 239 с.
9. Мотыжов С.В., Толстошеев А.П. и др. База данных оперативных дрифтерных наблюдений по Черноморскому региону. Свидетельство о регистрации базы данных № 2016620404 от 01.04.2016 г.

FEATURE OF FORMATION OF THE BLACK SEA SURFACE LAYER TEMPERATURE DURING AIR COLD INTRUSIONS

A. A. Sizov, T. M. Bayankina

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences,
Sevastopol', Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS V.M. Kotlyakov November 13, 2017

Received December 7, 2017

Application of the results of the drifter observations performed in the western Black Sea permitted to show that during air cold intrusions (CI) in winter accompanied by the wind (10 m/c and more), the upper mixed layer (UML) was cooled by 0,1–0,2 °C in course of a day. At that the seasonal thermocline (ST) and the cold intermediate water (CIW) sink deeper; after CI is over these layers rise to the depths smaller than their previous ones. It results in decrease of temperature in UML and its increase, as compared to the period preceding CI, in the layer below ST. The process of the sea upper layer mixing is explained by the fact that anti-cyclonic mesoscale vortices are involved in it.

Keywords: cold intrusion, upper quasi-homogeneous layer, cold intermediate water.