

Научная статья
УДК 551.582.2
EDN URLGZH

Повторяемость зимних вторжений холодного воздуха над Черным морем

В. В. Ефимов *, О. И. Комаровская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: vefim38@mail.ru*

Аннотация

Вторжения холодных воздушных масс в атмосферу над Черным морем зимой являются причиной интенсивного выхолаживания поверхностного слоя вод и способствуют формированию и развитию холодного промежуточного слоя. Хотя такие вторжения относительно редки, в зимние периоды они регулярно повторяются. Статья посвящена исследованию характеристик вероятности холодных вторжений в атмосферу Черноморского региона. Исследованы ряды суточных ветровых данных, а также данных о потоках явного и скрытого тепла и температуре моря зимой в различных точках на западе и востоке северной и центральной частей Черного моря. Выделены случаи вторжения холодных масс воздуха, характеризующиеся сильными ветрами северного направления. Рассмотрены статистические параметры ветров в характерных для ветра северо-западного, северного и северо-восточного направления точках в открытой центральной части моря и в прибрежной северо-западной и северо-восточной областях. Для морских точек построены розы ветров и графики кумулятивных распределений, позволившие определить периоды повторяемости сильных ветров северного направления в зимний период. Выявлена прямая зависимость величины потоков тепла с поверхности моря от скорости северного ветра в зимний период. Показано охлаждение морской воды как результат холодного вторжения для случая 2012 г. на примере полей понижения температуры моря на поверхности и на глубине 50 м.

Ключевые слова: Черное море, холодные вторжения, северный ветер, период повторяемости, потоки тепла, температура морской воды

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2024-0014 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, формирующих изменчивость физического состояния морской среды на различных пространственно-временных масштабах».

Для цитирования: Ефимов В. В., Комаровская О. И. Повторяемость зимних вторжений холодного воздуха над Черным морем // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 6–15. EDN URLGZH.

© Ефимов В. В., Комаровская О. И., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

The Recurrence of Winter Invasions of Cold Air over the Black Sea

V. V. Efimov *, O. I. Komarovskaya

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: vefim38@mail.ru

Abstract

Invasions of cold air masses into the atmosphere over the Black Sea in winter cause the intensive cooling of the surface water layer and contribute to the formation and development of a cold intermediate layer. Although such invasions are relatively rare, they regularly recur in winter. The article studies characteristics of the probability of cold invasions into the atmosphere of the Black Sea region. The article studies series of daily wind data, as well as data on sensible and latent heat fluxes and sea temperature in winter at various points in the west and east of the northern and central parts of the Black Sea. The cases of cold air masses invasion characterized by strong northerly winds were highlighted. The article considered statistical parameters of the winds in points characteristic of the north-westerly, northerly and north-easterly winds in the open central part of the sea and points in the coastal north-western and north-eastern regions. Wind roses and graphs of cumulative distributions were constructed for the offshore points which allowed determining the periods of recurrence of strong northerly winds in winter. A direct dependence of the magnitude of heat fluxes from the sea surface on the north wind speed in winter was revealed. It is shown that cold invasion led to seawater cooling as illustrated by the decrease in seawater temperature at the surface and at 50 m depth in 2012.

Keywords: Black Sea, cold invasions, northerly wind, recurrence period, heat fluxes, sea water temperature

Acknowledgements: The study was carried out under state assignment no. FNNN-2024-0014 “Fundamental studies of interaction processes in the sea–air system that form the physical state variability of the marine environment at various spatial and temporal scales”.

For citation: Efimov, V.V. and Komarovskaya, O.I., 2024. The Recurrence of Winter Invasions of Cold Air over the Black Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 6–15.

Введение

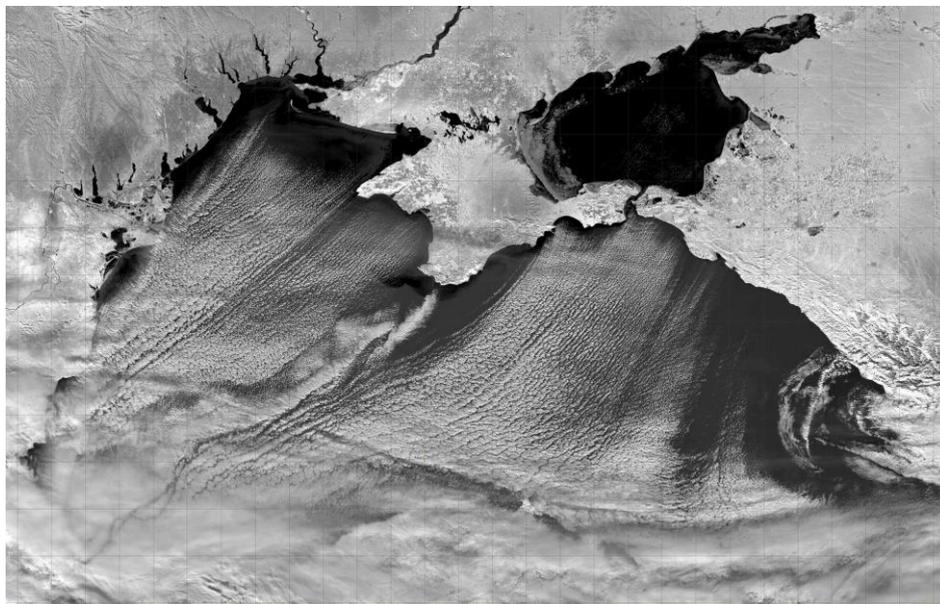
Выхолаживание поверхности Черного моря зимой наиболее интенсивно происходит при вторжении масс холодного воздуха через северную границу моря [1–5]. Вторжения холодного воздуха в атмосферу над Черным морем – это редкое, но повторяющееся явление для зимних периодов. Влияние таких вторжений менее выражено в южной и особенно в юго-восточной частях моря, здесь они более редки и менее интенсивны.

Обычно случаи вторжения масс холодного воздуха соответствуют прохождению через северную границу моря холодного атмосферного фронта. Они сопровождаются повышением скорости приземного ветра до 10–15 м/с и понижением температуры воздуха до –5...–10 °С. В результате в холодном

пограничном слое атмосферы над относительно теплым морем, температура которого в зимний период находится в пределах 5–9 °С, развивается интенсивная конвекция и облачность. Характерная картина облачности наблюдается на космических снимках в виде ячеистых или валиковых структур [2]. Пример такого снимка приведен на рис. 1.

Реакция Черного моря на такие случаи включает в себя понижение температуры поверхностного слоя, развитие сильного ветрового волнения и ветровых течений, а также значительное заглубление верхнего квазиоднородного слоя моря. Формируется такая важная особенность вертикальной термохалинной структуры моря, как холодный промежуточный слой (ХПС). Считается, что минимум температуры воды на глубинах 50–70 м формируется в областях открытого моря в результате глубокой проникающей конвекции в условиях больших потоков явного и скрытого тепла с поверхности моря [4, 6]. В качестве второй, менее важной причины формирования ХПС рассматривается адвективный перенос холодных вод из мелководного северо-западного района прибрежными западными течениями и далее на юг системой Основного Черноморского течения [4, 7–11].

Характеристики и механизмы формирования реакции моря на эпизоды вторжения холодных масс воздуха требуют дальнейшего изучения. Целью данной работы является статистическая оценка повторяемости таких явлений.



Р и с . 1 . Спутниковый снимок облачности при вторжении холодного воздуха 09.02.2012 (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/imagery/subsets/>)

F i g . 1 . A satellite image of clouding during the invasion of cold air on 9 February 2012 (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/imagery/subsets/>)

Данные и методы исследования

Для оценки характеристик вероятности вторжения холодного воздуха в атмосферу Черноморского региона использовались данные реанализа *ERA5* (пространственное разрешение $0.25^\circ \times 0.25^\circ$) о скорости ветра на высоте 10 м и величинах потоков тепла на поверхности моря [12], а также данные климатического реанализа *Copernicus* (разрешение около 10 км) о температуре воды и скорости приповерхностного ветра ¹⁾.

При выявлении случаев вторжения холодных масс воздуха в качестве определяющего признака было принято северное направление ветра при скорости ветра не менее 5 м/с на высоте 10 м. Северными считались направления ветра от строго северо-западного до строго северо-восточного, то есть диапазон углов выбранных направлений составлял 90° .

Исследовались ряды данных зимнего периода (январь и февраль) с временным интервалом 1 сут в выбранных точках отдельно на северо-западе и северо-востоке Черноморского региона. Эти две точки выбраны с учетом характерных особенностей метеорологического режима Черного моря в зимний период. Данные в северо-западной точке описывают вторжения холодного воздуха, который формируется на юго-восточной периферии антициклона с центром северо-западнее Крыма [13], в атмосферу северной границы моря. Вторая точка выбрана в области вторжения холодного северо-восточного воздуха, ответственного, в частности, за развитие Новороссийской боры [2]. Выбор двух зимних месяцев связан с более общей задачей – изучением механизма глубокого выхолаживания Черного моря, максимально развивающегося во второй половине зимнего периода года [9, 11].

Конечно, наш выбор критериев для определения вторжения холодных масс воздуха является достаточно условным. В то же время предварительный анализ массивов синоптических данных показывает, что именно при ветрах северо-восточного направления происходит преобладающее выхолаживание моря.

Полученные результаты и обсуждение

Для определения частоты ветров северного направления исследовались ряды скорости ветра в точках на северном побережье Черного моря с координатами (46.7° с. ш.; 31° в. д.) и (44.9° с. ш.; 38° в. д.). Данные относятся к зимним месяцам (январь, февраль) 1940–2022 гг. (83 года) и имеют временной интервал 1 сут. Ряды содержат 4918 значений (компоненты скорости ветра). В западной точке выявлено 1727 случаев ветра северного направления, в 685 случаях скорость ветра составляет не менее 5 м/с, максимум скорости составляет около 14.3 м/с, средняя скорость – около 6.5 м/с. В восточной точке выявлено 1009 случаев ветра северного направления, из них 117 дней со скоростью не менее 5 м/с, максимум составляет 9.6 м/с, средняя скорость – около 6.1 м/с.

Картина существенно меняется над морем, где рассматривались ряды суточных ветровых данных для января и февраля за 44 года (1980–2023 гг.) в двух морских точках на северо-западе (45.5° с. ш.; 31.5° в. д.) и северо-востоке (44° с. ш.; 37° в. д.), расположенных почти в центральной части моря.

¹⁾ E.U. Copernicus Marine Service Information : Global Ocean Physics Reanalysis. <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

Здесь длина ряда составляла 2607 значений. В западной морской точке выявлено 870 случаев ветра северного направления, из них в 680 случаев скорость ветра была не менее 5 м/с, максимум составлял 15.7 м/с, средняя скорость – 8.5 м/с. В восточной точке отмечено 877 случаев северного ветра, из них в 623 случаях скорость ветра была не менее 5 м/с, максимум – 19.4 м/с, средняя скорость – 8.4 м/с.

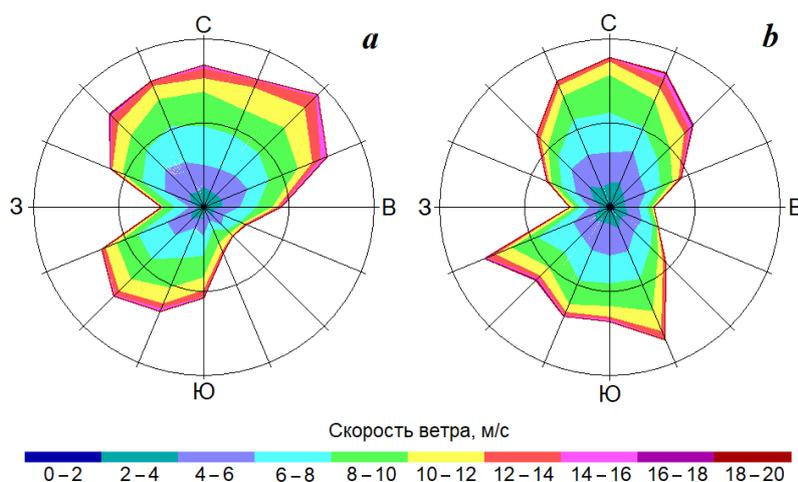
На рис. 2 приведены розы ветров, построенные по этим ветровым данным.

Видно различие в форме построенных роз ветров: в восточной точке значительно больше доля ветров северо-восточного направления со скоростью, превышающей 6 м/с. Кроме того, и в восточной, и в западной точке мала доля ветров западного и восточного направлений, причем основной вклад дают достаточно слабые ветры. Отметим, что мы рассматриваем распределения скорости приводного ветра, то есть ветра, существенно зависящего от особенностей пограничного слоя атмосферы, таких как орография и температурные контрасты между морем и сушей в прибрежных областях [14]. Различие роз ветров в двух точках над морем, разнесенных на расстояние около 600 км, в первую очередь связано с этими краевыми эффектами, например с влиянием достаточно высоких Крымских и Кавказских гор.

Для оценки таких важных вероятностных характеристик, как возвратные значения и периоды повторяемости (т. е. значения, встречающиеся один раз в определенный срок, так называемый период повторяемости для данного возвратного значения), использовано обобщенное распределение экстремальных значений (*GEV – Generalized Extreme Value*)

$$F(x, \mu, \sigma, \xi) = e^{-\left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}},$$

где μ – параметр расположения; σ и ξ – параметры масштаба и формы соответственно.



Р и с . 2 . Розы ветров в морских точках на западе (а) и востоке (b)

F i g . 2 . Wind roses for offshore points in the west (a) and east (b)

Возвратные значения и периоды повторяемости связаны соотношением

$$F = (1 - 1/T(U)),$$

где F – оценка плотности вероятности (процентиль) для возвратного значения оцениваемой величины U и времени его ожидания (периода повторяемости) T .

Распределение GEV позволяет аппроксимировать так называемые хвосты кумулятивных функций распределения для значений, превышающих выбранное пороговое значение.

На рис. 3 представлены кумулятивные распределения значений скорости ветра северного направления в морских точках в логарифмических координатах от порогового значения 6 м/с. Различие графиков демонстрирует несколько более высокие значения вероятности скорости ветра в диапазоне значений до ~12 м/с в западной точке. Экстремально большие значения скорости ветра наблюдались в восточной точке, хотя различие здесь между ними также невелико. Интересно, что именно в этой восточной области моря в зимний период года наблюдаются явления сильного ветра – Новороссийской боры.

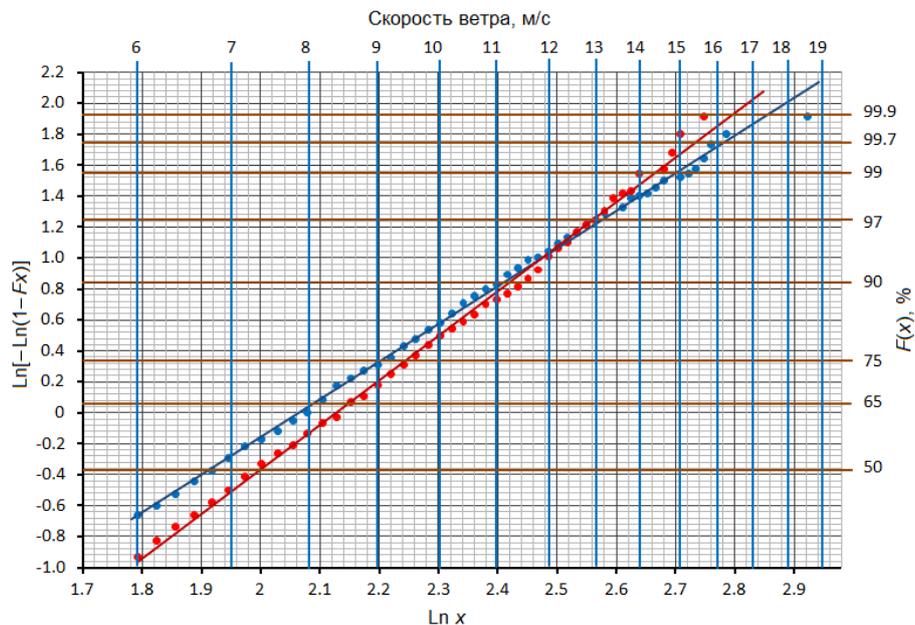


Рис. 3. Кумулятивное распределение значений скорости ветра в логарифмических координатах в морских точках на северо-западе и северо-востоке Черного моря (синие точки – 44° с. ш., 37° в. д.; красные точки – 45.5° с. ш., 31.5° в. д.)

Fig. 3. Cumulative distribution functions of wind speed values in logarithmic coordinates at offshore points in the north-west and north-east of the Black Sea (the blue dots are 44° N, 37° E; the red dots are 45.5° N, 31.5° E)

Периоды повторяемости T (сут) для рядов суточных значений скорости северного ветра в морских точках для января – февраля в 1980–2023 гг.

Recurrence periods T (days) for the series of daily values of northerly wind speed at offshore points for January–February in 1980–2023

U , м/с / U , m/s	45.5° с. ш., 31.5° в. д. / 45.5° N, 31.5° E	44° с. ш., 37° в. д. / 44° N; 37° E
8	7.2	8.4
9	10.2	11.9
10	15.8	17.7
11	26.6	28.3
12	49.6	48.2
13	102.7	87.7
14	238	171
15	623	359

Важной характеристикой аномальности скорости ветра является период повторяемости, представляющий собой время ожидания конкретного экстремального значения. Аппроксимации данных распределений позволили получить оценки для периодов повторяемости высоких скоростей ветра. Оценки периодов повторяемости T для возвратных наибольших значений скорости ветра северного направления на высоте 10 м U в этих морских точках приведены в таблице.

Согласно полученным результатам, эпизоды вторжения холодного воздуха со скоростями, превышающими 8 м/с, имеют средний период повторяемости около 8 сут.

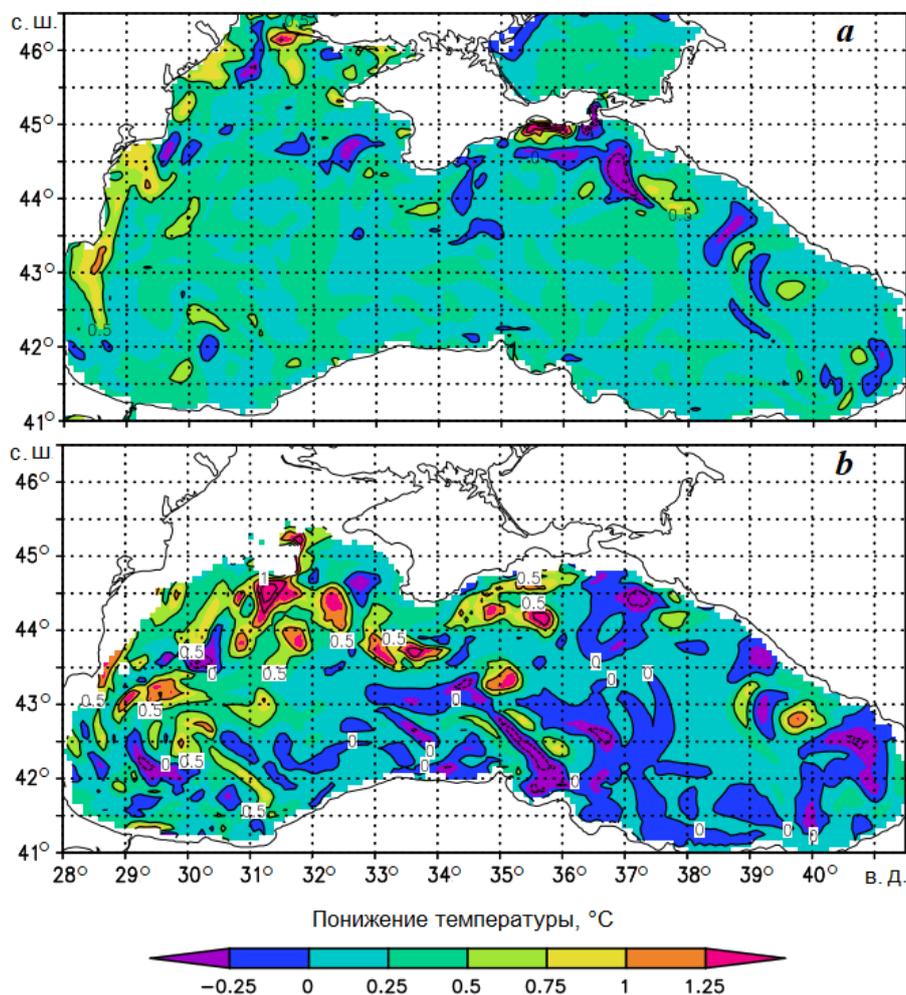
Большие значения скорости ветра имеют более длительный период повторяемости. Холодные вторжения со скоростью более 14 м/с повторяются в восточной точке моря достаточно редко – примерно раз в 5.5 месяца, которые отсчитываются днями в зимние периоды января и февраля. В западной точке – еще реже, раз в 8 месяцев (то есть примерно раз в 4 года).

Выявлена прямая зависимость величины потоков явного и скрытого тепла с поверхности моря от величины скорости ветра северного направления, получено линейное соотношение между ними: $H = 37.9 U$, где H – суммарный поток тепла; U – скорость ветра.

С учетом достаточно высокой коррелированности скорости ветра и суммарного потока тепла (достоверность аппроксимации $R \sim 0.5$) основное внимание было уделено именно реакции температуры моря на возмущения скорости ветра.

Эпизоды холодных вторжений, несмотря на их кратковременность (обычно не более 2–3 сут), оказывают заметное влияние на понижение температуры в достаточно глубоком слое воды. По данным климатического реанализа *Copernicus* с использованием указанных критериев был выбран случай холодного вторжения 8–9 февраля 2012 г.

Как видно из рис. 4, понижение температуры распространилось в верхнем слое вплоть до глубины 50 м. При этом распределение понижения поверхностной температуры моря пространственно значительно более однородно по сравнению с полем понижения температуры на глубине 50 м. Вообще говоря, физический механизм глубокого проникающего охлаждения в зимний период, проявляющегося в неоднородностях поля температуры, требует отдельного рассмотрения.



Р и с . 4 . Понижение температуры воды Черного моря на поверхности (а) и на глубине 50 м (b) за двое суток холодного вторжения 10.02.2012

Fig . 4 . Decrease of the Black Sea water temperature at the surface (a) and at a depth of 50 m (b) during two days of the cold air invasion of 10 February 2012

Заклучение

Случаи вторжения холодного воздуха через северную, северо-западную и северо-восточную границу Черного моря в зимний период, обычно сопровождающиеся повышенными скоростями ветра и пониженными значениями температуры, можно отнести к экстремальным метеорологическим явлениям, требующим дальнейших исследований. Для их изучения были привлечены массивы данных реанализа *ERA5* и климатического реанализа *Copernicus* с повышенным пространственным разрешением.

Выбраны две точки, расположенные в восточной и западной частях северной области Черного моря, близкие к центральной. Для них построены функции распределения экстремальных значений скорости ветра. Оценены

периоды повторяемости высоких скоростей ветра при вторжении холодного воздуха с севера в зимний период.

Показано, что случаи вторжений, при которых значительно повышается скорость ветра и понижается температура воздуха, являются относительно редкими событиями. Однако они приводят к заметному понижению температуры моря от поверхности вплоть до глубин 40–50 м. Для одного из примеров холодного вторжения 8–9 февраля 2012 г. приведены данные об изменении температуры моря на поверхности и на глубине 50 м в течение двух суток.

Более детальный анализ физических механизмов реакции Черного моря на эпизоды вторжений холодного воздуха, выделенных с использованием полученных оценок, на базе совместной модели атмосфера – море *WRF-NEMO* выходит за рамки статьи и будет представлен позднее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4 : Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1991. 429 с.
2. *Ефимов В. В., Комаровская О. И., Баянкина Т. М.* Временные характеристики и синоптические условия образования экстремальной новороссийской боры // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 409–422. EDN XАНKNF. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-409-422>
3. *Ефимов В. В., Яровая Д. А.* Численное моделирование конвекции в атмосфере при вторжении холодного воздуха над Черным морем // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 6. С. 692–703. EDN SYYYLX. <https://doi.org/10.7868/S0002351514060078>
4. *Овчинников И.М., Попов Ю.И.* Формирование холодного промежуточного слоя в Черном море // Океанология. 1987. Т. 27, № 5. С. 739–746.
5. *Яровая Д. А., Ефимов В. В.* Развитие холодной аномалии температуры поверхности Черного моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 4. С. 471–483. EDN YAJJOC. <https://doi.org/10.31857/S0002351521040118>
6. *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.
7. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
8. *Коротаев Г. К., Кныш В. В., Кубряков А. И.* Исследование процессов формирования холодного промежуточного слоя по результатам реанализа гидрофизических полей Черного моря за 1971–1993 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 1. С. 41–56. EDN RTOUVN. <https://doi.org/10.7868/S0002351513060102>
9. *Куклев С. Б., Зацепин А. Г., Подымов О. И.* Формирование холодного промежуточного слоя в шельфово-склоновой зоне северо-восточной части Черного моря // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 3. С. 58–71. EDN YTCWVR. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(3\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).5)
10. *Белокопытов В. Н.* Межгодовая изменчивость обновления вод холодного промежуточного слоя Черного моря в последние десятилетия // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 5. С. 33–41. EDN TOERWX.
11. *Stanev E. V., Peneva E., Chtirkova B.* Climate change and regional ocean water mass disappearance: case of the Black Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124, iss. 7. P. 4803–4819. <https://doi.org/10.1029/2019JC015076>

12. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146, iss. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
13. *Ефимов В. В., Савченко А. О., Анисимов А. Е.* Особенности теплообмена Черного моря с атмосферой в осенне-зимний период // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 6. С. 71–81. EDN TECBAN.
14. *Ефимов В. В., Анисимов А. Е.* Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 380–392. EDN NWCJAN.

Поступила 8.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 6.03.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

Ефимов Владимир Васильевич, заведующий отделом взаимодействия атмосферы и океана, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **SPIN-код: 4902-8602, ORCID ID: 0000-0002-4262-9902, ResearcherID: P-2063-2017, Scopus Author ID: 7202138991, vefim38@mhi-ras.ru**

Комаровская Ольга Иридиевна, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 2684-3872, ORCID ID: 0000-0003-1415-1283, ResearcherID: G-1814-2019, Scopus Author ID: 6504262996, komarovskaya@mhi-ras.ru**

Заявленный вклад авторов:

Ефимов Владимир Владимирович – формулировка и постановка задачи, подготовка текста статьи

Комаровская Ольга Иридиевна – проведение расчетов, подготовка графических материалов, редактирование текста

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи