

## Синоптические вариации температуры воды в Мартыновой бухте (Черное море) в 2000–2020 годы и определявшие их факторы

П. Д. Ломакин<sup>1\*</sup>, М. А. Попов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

<sup>2</sup> *Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия*

\* e-mail: p\_lomakin@mail.ru

### Аннотация

На основе анализа выборки ежесуточных прибрежных наблюдений раскрыты закономерности временной изменчивости температуры воды в Мартыновой бухте с 2000 по 2020 г. Во временном ходе температуры воды отслежен отклик (в виде положительных и отрицательных экстремумов) на синоптические процессы в атмосфере и море. В холодное время года выявлено три группы таких экстремумов: отчетливо выраженные максимумы в ноябре, определявшиеся выносом на Черное море теплой воздушной массы из Закавказья; минимумы в декабре – феврале, обусловленные арктическими вторжениями; и менее значимые максимумы в феврале – марте как следствие фёнового эффекта. В теплое полугодие во временном ходе температуры воды выделены две группы экстремумов: максимумы, обусловленные перегретыми воздушными массами, которые распространялись на Черное море из района Сальских степей в июне – августе, и минимумы в июне – сентябре, связанные с влиянием черноморского апвеллинга. Показано, что в бухтах северного берега Гераклейского полуострова колебания температуры воды, вызываемые сгонно-нагонными ветрами, незначительны. Их размах не превышает 1 °С, а длительность цикла, как правило, не более 1 сут.

**Ключевые слова:** температура воды, аномалии, арктическое вторжение, фён, апвеллинг, сгонно-нагонные явления, бухты Севастополя, Крым

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовых зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования» (шифр «Прибрежные исследования») и государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса», № гос. регистрации 121030300149-0.

© Ломакин П. Д., Попов М. А., 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

**Для цитирования:** Ломакин П. Д., Попов М. А. Синоптические вариации температуры воды в Мартыновой бухте (Черное море) в 2000–2020 годы и определявшие их факторы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 110–122. EDN MYQGGD.

## Synoptic Water Temperature Variations in Martynova Bay (Black Sea) in 2000–2020 and the Factors Defining Them

P. D. Lomakin<sup>1</sup>\*, M. A. Popov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup> A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

\* e-mail: p\_lomakin@mail.ru

### Abstract

The paper analyses a sample of daily coastal observations to reveal patterns of water temperature temporal variability in Martynova Bay for 2000–2020. In the time course of water temperature, a response (in the form of positive and negative extremes) to synoptic processes in the atmosphere and sea was tracked. In the cold season, three groups of such extrema were identified. These are clearly expressed maximums in November determined by the transfer of warm air mass from the Transcaucasia to the Black Sea; minimums in December–February due to Arctic invasions; and less significant highs in February–March caused by the foehn wind effect. In the warm half of the year, two groups of extremes were identified in the time course of water temperature. These are maxima caused by overheated air masses, which spread to the Black Sea from the Sal steppes in June–August, and minimums in June–September associated with the influence of the Black Sea upwelling. It is shown that in the bays of the northern coast of the Heracleon Peninsula, fluctuations in water temperature caused by surge winds were insignificant. Their range did not exceed 1°C, and the duration of the cycle, as a rule, was no more than one day.

**Keywords:** water temperature, anomalies, Arctic invasion, foehn, upwelling, surge phenomena, bays of Sevastopol, Crimea

**Acknowledgements:** the work was performed under state assignment of MHI RAS on topic FNNN-2024-0016 “Studies of spatial and temporal variability of oceanological processes in the coastal, near-shore and shelf zones of the Black Sea influenced by natural and anthropogenic factors on the basis of in situ measurements and numerical modelling” (code “Coastal studies”) and state assignment of IBSS on topic “Research of control mechanisms for production processes in biotechnological complexes with the aim of developing scientific foundations for obtaining biologically active substances and technical products of marine genesis”, state registration no. 121030300149-0

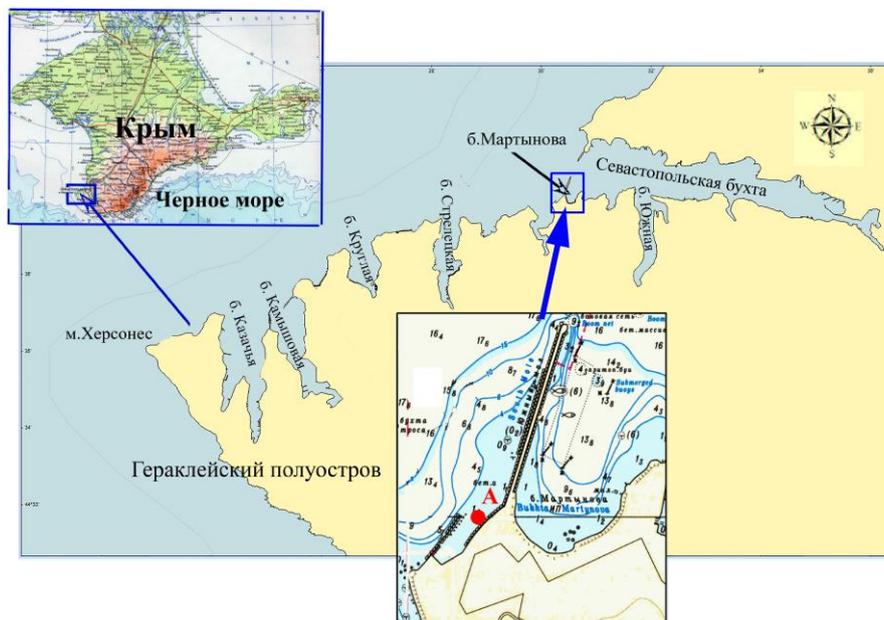
**For citation:** Lomakin, P.D. and Popov, M.A., 2024. Synoptic Water Temperature Variations in Martynova Bay (Black Sea) in 2000–2020 and the Factors Defining Them. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 110–122.

### Введение

Мартынова бухта расположена на юго-западе Севастопольской бухты, в ее устье. До 1970-х гг. она не входила в состав Севастопольской бухты. В настоящее время от открытого моря бухта отделена южным молом. Ее максимальная глубина 17 м – у оконечности мола. Меридиональная протяженность и ширина на входе около 480 м. Водообмен с открытым морем ограничен. Независимо от направления и силы ветра в Мартыновой бухте преобладает слабое волнение. В открытой части моря за южным молом размещена устрично-мидийная ферма ООО НИО «Марикультура». В этой акватории Институт биологии южных морей (ИнБИОМ) регулярно проводит наблюдения за температурой воды (рис. 1).

Временные ряды наблюдений за параметрами водной среды в прибрежных водах чрезвычайно важны для совершенствования знания в различных областях морской науки. Сочетание прибрежных временных наблюдений с наблюдениями в открытых водах, которые, как правило, представлены в виде пространственных распределений, позволяет раскрыть закономерности временной изменчивости полей океанологических величин в океанах и морях [1, 2].

Прикладная значимость результатов анализа наблюдений в рассматриваемой бухте заключается в их репрезентативности, как для всей акватории Черного моря, так и региона моря у Юго-Западного Крыма, включая бухты и открытые участки севастопольского взморья.



Р и с . 1 . Географическое положение Мартыновой бухты (А – точка наблюдений за температурой воды)

Fig . 1 . Geographical position of Martynova Bay (A is the point of water temperature observations)

Цель работы – на основе анализа прибрежных наблюдений раскрыть закономерности синоптической изменчивости температуры воды в Мартыновой бухте за временной интервал с 2000 по 2020 г., а также выявить факторы, определяющие соответствующие виды колебаний.

#### **Исходные данные и методы исследования**

Для анализа использована выборка ежесуточных (проводимых в 12:00 (GMT +3)) прибрежных наблюдений за температурой воды с 2000 по 2020 г., которые проводились в Мартыновой бухте в районе устрично-мидийной фермы ООО НИО «Марикультура» (точка А на рис. 1).

Сведения об атмосферной синоптической ситуации в Азово-Черноморском бассейне получены путем анализа синоптических карт из архива Гидрометцентра *Wetterzentrale* (Германия) (URL: <http://old.wetterzentrale.de/topkarten/fsreacur.html>).

Данные о погоде в Севастополе в синоптические сроки взяты на сайте «Погода» МГ «Херсонесский маяк» (URL: [http://gr5.am/Погода\\_на\\_Херсонесском\\_маяке](http://gr5.am/Погода_на_Херсонесском_маяке)).

Для удобства анализа весь исходный массив фактических наблюдений за температурой воды был разделен на две части, относившимся к холодному (ноябрь – апрель) и теплomu (май – октябрь) полугодиям. Затем эти данные были усреднены подекадно. Далее для каждого полугодия в системе координат «текущие сутки, текущий год» и «текущая декада, текущий год» построены временные развертки температуры (рис. 2, 3), которые были использованы для оценки отклика рассматриваемой величины на синоптические процессы в атмосфере и в море, а также локальные региональные процессы.

Усредненные схемы рассчитаны для фильтрации шума и оценки значимости экстремумов, обнаруженных в фактических временных развертках. Детально рассматривались только значимые экстремумы, проявившиеся в средних декадных развертках.

#### **Обсуждение результатов**

На временных развертках как фактической, так и средней декадной температуры воды видны положительные и отрицательные локальные экстремумы, свидетельствующие о процессах различного временного масштаба в атмосфере и в море, определявших изменчивость рассматриваемого параметра водной среды (рис. 2, 3).

В холодное время года выявлено три группы таких экстремумов: отчетливо выраженные максимумы в ноябре, минимумы в декабре – феврале и менее значимые максимумы в феврале – марте.

В ноябре во временной развертке фактической температуры воды максимум наблюдался в 15 случаях (годах) из 21, тогда как в развертке средней декадной температуры этот экстремум более или менее четко проявился только 12 раз: в 2000, 2004, 2005, 2007–2010, 2012, 2015, 2018–2020 гг. (рис. 2).

В эти годы для ноября по архивным синоптическим картам был выполнен анализ атмосферной синоптической ситуации, который показал следующее. Погода над Черным морем определялась влиянием южной юго-западной периферии Сибирского антициклона (Закавказье), что обуславливало вынос тепла из прогретого континента (рис. 4).

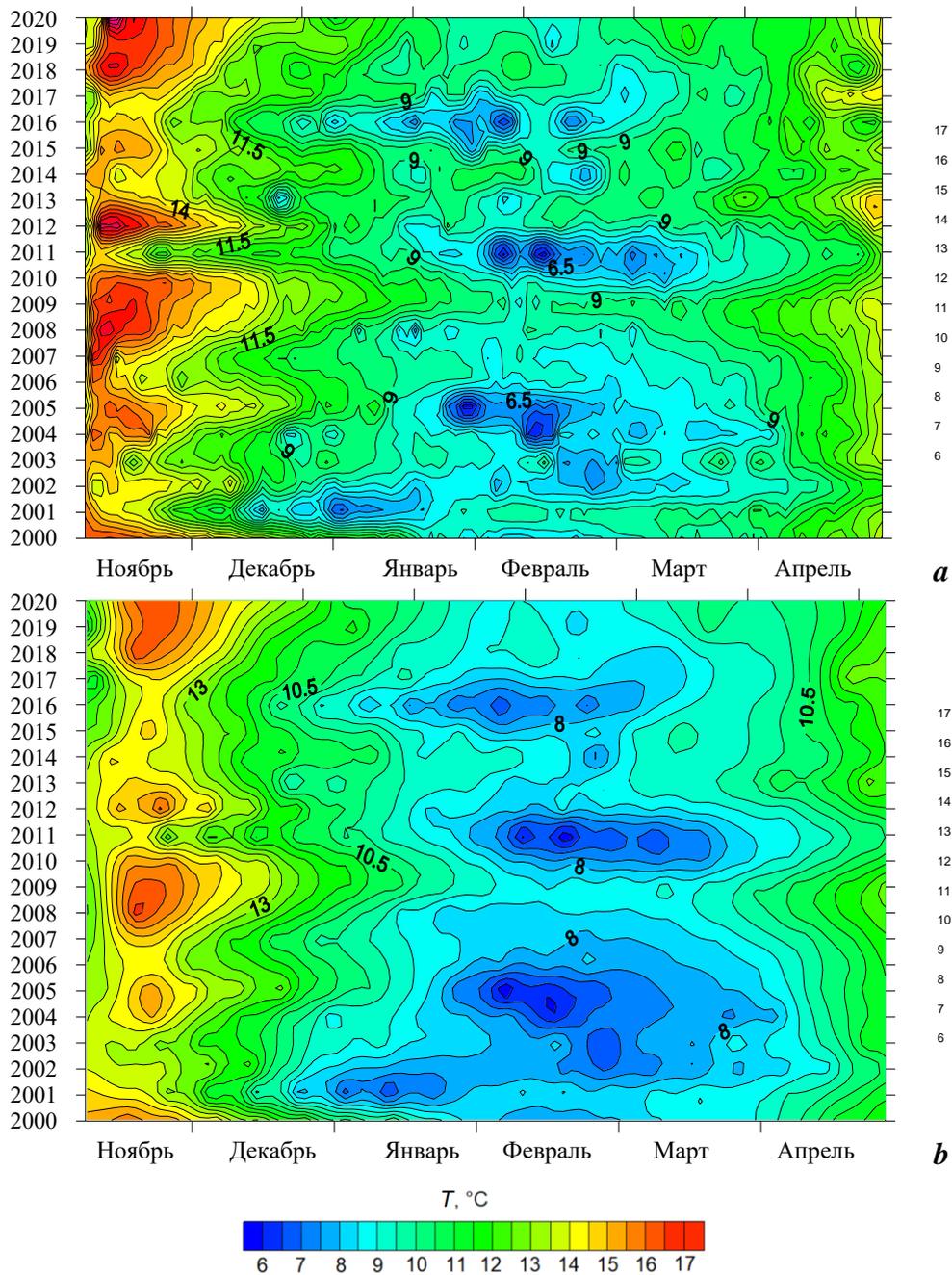


Рис. 2. Временной ход температуры воды в Мартыновой бухте в течение холодного полугодия за 2000–2020 гг.: суточной (a), средней декадной (b)

Fig. 2. Time variations of water temperature in Martynova Bay during the cold half of the year for 2000–2020: daily (a), average ten-day (b)

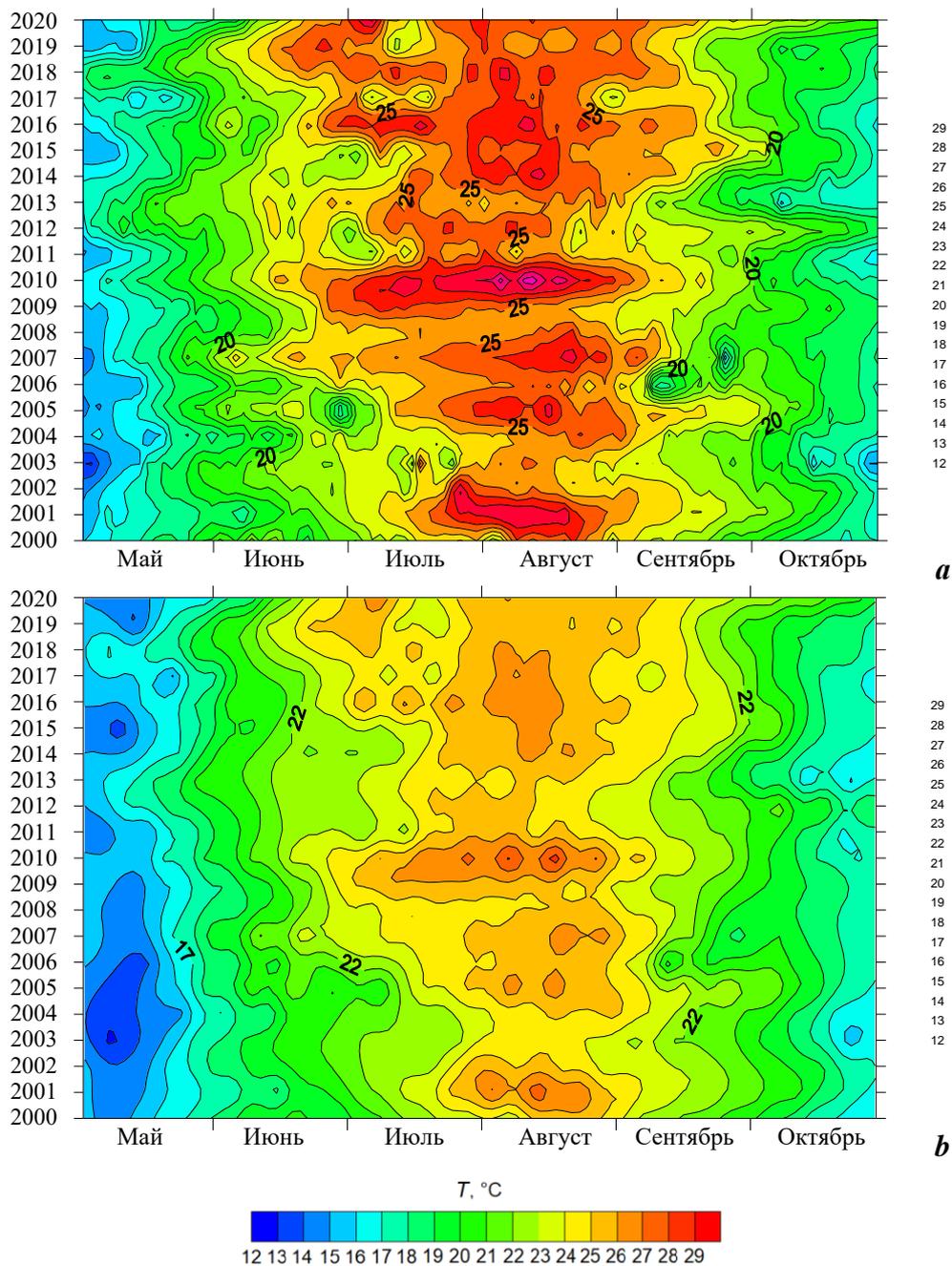
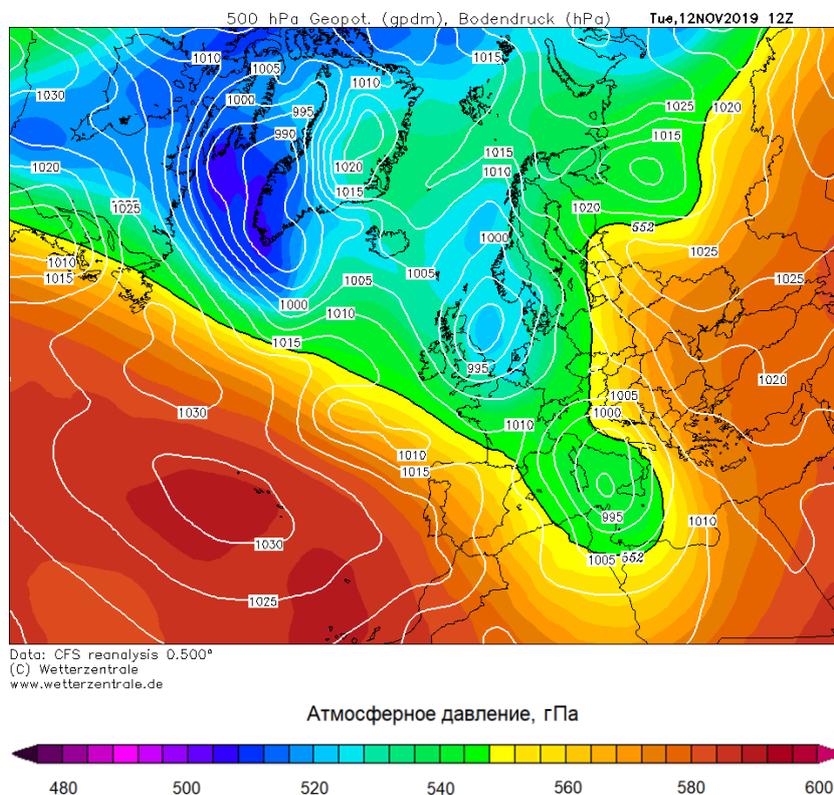


Рис. 3. Временной ход температуры воды в Мартыновой бухте в течение теплого полугодия за 2000–2020 гг.: суточной (а), средней декадной (b)

Fig. 3. Time variations of water temperature in Martynova Bay during the warm half of the year for 2000–2020: daily (a), average ten-day (b)



Р и с . 4. Синоптическая ситуация, иллюстрирующая вынос тепла из Закавказья на Черное море в системе циркуляции южной юго-западной периферии Сибирского максимума, в 12:00 (GMT) 12.11.2019

Fig. 4. Synoptic situation illustrating the transfer of heat from Transcaucasia to the Black Sea in the circulation system of the southern south-western periphery of the Siberian High, map on 12 November 2019, 12:00 GMT

В течение этого атмосферного естественного антициклонального синоптического периода продолжительностью от 1 до 2 декад воздух в Севастополе прогревался до 15–20 °С, а температура воды в Мартыновой бухте на фоне сезонного выхолаживания повышалась на 0.6–1.7 °С и достигала 15.1–17.4 °С.

В подобных ситуациях в севастопольских бухтах происходит заметный прогрев мелководных кутовых частей, где также формируется вертикальная стратификация поля температуры. На границе с центральными областями бухт возникают достаточно выраженные фронтальные температурные разделы. В утренние часы при максимальной разности температуры воды и воздуха (до 10 °С) над кутовыми частями бухт наблюдается парение моря.

Еще один значимый атмосферный естественный синоптический процесс, способствовавший экстремальному выхолаживанию прибрежных вод в холодное полугодие, обусловлен арктическими вторжениями холодных воздушных масс. Характерная для арктического вторжения синоптическая ситуация определялась тыловой частью меридионально ориентированной с Карского

на Черное море ложбины (рис. 5). Наиболее мощные затоки арктического холода, наблюдавшиеся в декабре – феврале, сопровождались значительным (до  $-17...-15$  °С) падением температуры воздуха в Севастополе, а температура воды в Мартыновой бухте понижалась до минимальных значений (4–6 °С).

Во временном ходе фактической температуры воды локальные минимумы, связанные с арктическими вторжениями, наблюдались в 9 случаях (годах) из 21 (см. рис. 2, *a*). В развертке средней декадной температуры за холодное полугодие наиболее значительные экстремумы проявились 8 раз: в 2001, 2003–2005, 2011, 2014–2016 гг. (рис. 2, *b*).

Незначительное повышение температуры воды, отмечавшееся в феврале – марте, было обусловлено локальным метеорологическим явлением – фёновым эффектом.

Фён в Севастополе, как правило, наблюдается в феврале при юго-восточном переносе в атмосфере. При этом сухой теплый ветер с отрогов Крымских гор

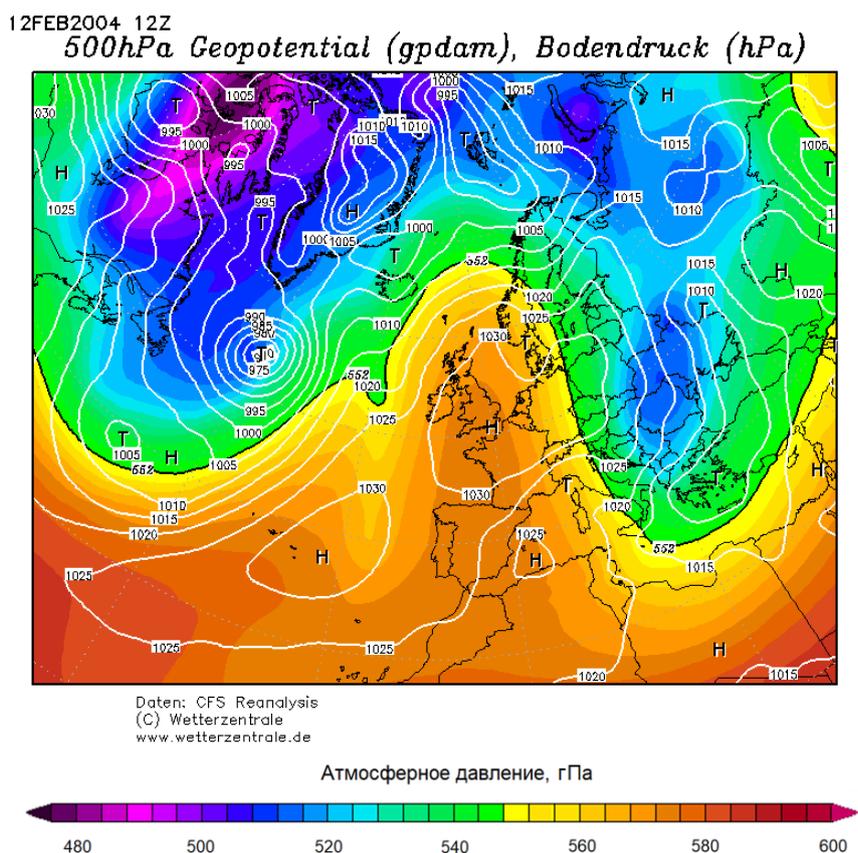


Рис. 5. Синоптическая ситуация в условиях арктического вторжения на Черное море в 12:00 (GMT) 12.04.2004

Fig. 5. Synoptic situation during the polar invasion of the Black Sea, map on 12 February 2004, 12:00 GMT

способствует затоку теплого воздуха и установлению сухой ясной погоды с температурой воздуха в Севастопольском регионе до 20 °С и выше. Подобные периоды иногда называют февральскими окнами (URL: <https://www.c-inform.info/news/id/83349>).

Фён как локальное явление, длящееся от нескольких суток до декады, не приводит к более или менее значительному повышению температуры воды. По анализируемым данным, как правило, приращение температуры воды, обусловленное фёновым эффектом, не более 0.5 °С; в отдельных случаях 0.6–0.8 °С.

Фёны – довольно часто наблюдаемое явление в конце зимы. В поле фактической температуры воды они фиксировались почти ежегодно за исключением четырех лет с наиболее низкой зимней температурой – 2004, 2005, 2011, 2016 гг. (рис. 2, *a*).

Самые интенсивные фёны, вызывавшие прогрев вод в Мартыновой бухте на 0.6–0.8 °С, достаточно редки и наблюдались только в 2015 и 2018–2020 гг. (рис. 2, *b*).

Для Севастопольского региона фёновый эффект чрезвычайно важен в экологическом плане. Резкое повышение температуры воздуха в конце зимы вызывает интенсивное таяние снега на водосборах крымских рек, которые традиционно считаются загрязненными [3]. Расход воды в реках почти мгновенно возрастает до значений, которые на порядок превышают средние. При этом в бухты и открытые участки моря поступает огромное количество загрязняющих веществ. Эти явления детально рассмотрены для района Балаклавской бухты в книге [4].

В теплое время года во временном ходе температуры воды выявлены две группы экстремумов: отчетливо выраженные максимумы в июне – августе и минимумы в июне – сентябре (см. рис. 3).

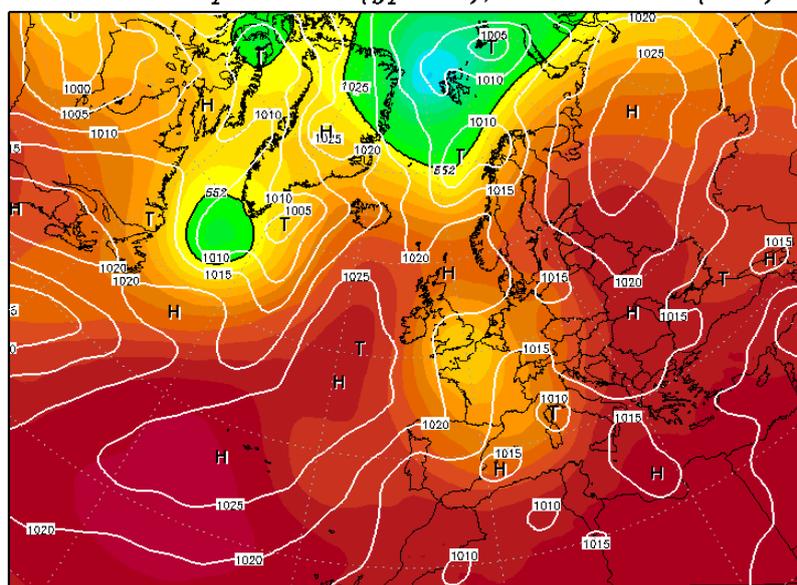
Высокая фактическая температуры воды (26–28 °С) наблюдалась в 2005, 2007, 2012, 2014–2017 гг. Максимально (до 28–30 °С) море в анализируемой бухте прогревалось в 2001 и 2010 гг. (рис. 3, *a*). В 2001, 2010, 2014–2017 гг. максимумы температуры (27–28 °С) проявились в средней декадной развертке (рис. 3, *b*).

Рассмотренные выше случаи обусловлены экстремально высокой температурой воздуха (до 33–37 °С). В июле – августе перегретые воздушные массы распространялись на Азово-Черноморский бассейн северо-восточным ветром из района Сальских степей, где средняя температура воздуха в летний период достигает 35–45 °С [5]. При этом синоптическая ситуация определялась восточной юго-восточной периферией Азорского антициклона (рис. 6).

Наблюдавшиеся в июне – сентябре циклические изменения температуры воды на временном масштабе от нескольких суток до 2–3 декад, которые сопровождались существенным ее понижением, были обусловлены прибрежным черноморским апвеллингом. Прибрежный черноморский апвеллинг – наиболее значимый механизм, реализующий водообмен между шельфовой и глубоководной зонами моря, относительно хорошо изучен для глубоководных акваторий, расположенных по периметру Черного моря. Природу этого явления связывают с влиянием атмосферной циркуляции над Азово-Черноморским бассейном [6–8].

14AUG2010 12Z

*500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)*



Daten: CFS Reanalysis  
(C) Wetterzentrale  
www.wetterzentrale.de

Атмосферное давление, гПа



Рис. 6. Синоптическая ситуация, обуславливающая вынос перегретого воздуха на Черное море из Сальских степей, в 12:00 (GMT) 14.08.2010

Fig. 6. Synoptic situation in conditions of superheated air outflow to the Black Sea from the Sal steppes, map on 14 August 2010, 12:00 GMT

Особенности прибрежного черноморского апвеллинга в Мартыновой бухте и на Севастопольском взморье проанализированы в статье [9] и кратко перечислены ниже. Наиболее мощные апвеллинги были отмечены в июне 2001 г., июне – июле 2005 г., сентябре 2006 г., сентябре 2007 г., июле – августе 2011 г., июле – августе 2013 г., июле – августе 2015 г., июле и сентябре 2017 г., июле 2019 г., июле 2020 г. (рис. 5). Всего за временной интервал с 2000 по 2020 г. зафиксировано 42 случая апвеллинга с размахом температуры 2–7 °С. Их длительность изменялась от 4 до 32 сут.

Наиболее часто в Мартыновой бухте апвеллинги фиксировались в июне – июле. Самые интенсивные были отмечены в июне. Такая же закономерность типична для апвеллинга в районе свала глубин у западного берега Крыма [7]. Наибольшую повторяемость (31 %) имели апвеллинги с длительностью цикла 4–8 сут. Гораздо реже наблюдались апвеллинги с циклом 20–32 сут. Их суммарная повторяемость 11 %.

К характерным свойствам гидрологического режима сева­стопольских бухт относят сгонно-нагонные явления [10]. Анализируемый массив в силу дискретности наблюдений не позволяет рассмотреть подобные явления.

Наблюдения за температурой воды, которые велись в Севастопольском морском рыбном порту в Камышовой бухте и на пляже в б. Круглой (Омега) с дискретностью 6 ч, показали, что колебания температуры воды, вызываемые сгонно-нагонными ветрами, незначительны. Их размах не превышает 1 °С, а длительность цикла, как правило, не более 1 сут.

Данный эффект можно объяснить морфометрическими особенностями и расположением бухт северного берега Герак­лейского полуострова, а также ветровым режимом Севастопольского региона. Осевые линии бухт – от Каза­чьей до Южной – (см. рис. 1) ориентированы по меридиану, а сами бухты обращены открытыми частями на север. Ветры северной четверти вызывают нагон, ветры южной четверти – сгон.

Особое свойство бризовой циркуляции в Севастопольском регионе заключается в том, что дневной северо-западный бриз, как и ночной северо-восточный бризовый ветер, обладают значимой северной составляющей, которая в теплое время года часто превалирует над градиентным ветром. Поэтому в теплое полугодие северный берег Герак­лейского полуострова с его бухтами в основном подвержен влиянию нагонного ветра. Сгонные ветры южной четверти, вызывающие понижение температуры воды, редки, к тому же в пределах каждой из бухт они обладают крайне ограниченным разгоном, а смежная акватория сева­стопольского взморья имеет относительно небольшую глубину.

Отмеченное выше позволяет полагать, что у северного берега Герак­лейского полуострова и в соответствующих бухтах сгонно-нагонные колебания температуры воды небольшие, их размах не более 1 °С.

### **Заключение**

На основе анализа выборки ежесуточных прибрежных наблюдений рассмотрены закономерности временной изменчивости температуры поверхностного слоя вод в Мартыновой бухте с 2000 по 2020 г., проанализированы факторы, приводившие к этой изменчивости.

Во временном ходе температуры воды, как фактической, так и средней декадной, отслежен отклик (в виде положительных и отрицательных экстремумов) на синоптические процессы в атмосфере и в море.

В холодное время года выявлено три группы таких экстремумов: отчетливо выраженные максимумы в ноябре, минимумы в декабре – феврале и менее значимые максимумы в феврале – марте.

Повышение температуры воды в ноябре на 0.6–1.7 °С на фоне сезонного выхолаживания определялось выносом на Черное море теплой воздушной массы из Закавказья в системе циркуляции южной юго-западной периферии Сибирского максимума. Падение температуры воды до минимума 4–6 °С в декабре – феврале обеспечивали арктические вторжения. Фёны в феврале – марте сопровождалась прогревом воды в Мартыновой бухте примерно на 0.5 °С.

В теплое полугодие во временном ходе температуры воды выделены две группы экстремумов: максимумы в июне – августе и минимумы в июне – сентябре.

Экстремально высокая температура воды 28–30 °С была обусловлена перегретыми воздушными массами, которые распространялись на Черное море из района Сальских степей, где средняя температура воздуха в летний сезон достигает 45 °С. При этом синоптическая ситуация над Черным морем определялась восточной юго-восточной периферией Азорского антициклона.

Наблюдавшиеся в июне – сентябре циклические изменения температуры воды на временном масштабе от нескольких суток до 2–3 декад, которые сопровождалась ее понижением на 2–7 °С, были обусловлены черноморским апвеллингом.

В бухтах северного берега Гераклеийского полуострова колебания температуры воды, вызываемые сгонно-нагонными ветрами, незначительны. Их размах не превышает 1 °С, а длительность цикла, как правило, не более 1 сут.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Upper ocean warming and sea ice reduction in the East Greenland Current from 2003 to 2019 / L. de Steur [et al.] // *Communications Earth and Environment*. 2023. Iss. 4. 261. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00913-3>
2. Recommendations for plankton measurements on OceanSITES moorings with relevance to other observing sites / E. Boss [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. 929436. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.929436>
3. Источники загрязнения прибрежных вод севавтопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. EDN BEOVBV. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574594579-590>
4. Ломакин П. Д., Попов М. А. Океанологическая характеристика и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 220 с.
5. Панов В. Д., Лурье П. М., Ларионов Ю. А. Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра. Ростов-на-Дону : Донской издательский дом, 2006. 488 с.
6. Прибрежный апвеллинг в северо-западной части Черного моря / А. И. Гинзбург [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. 1997. № 6. С. 61–72. EDN LFUSLJ.
7. Структура и межгодовая изменчивость характеристик прибрежного черноморского апвеллинга на основе данных спутникового мониторинга / Р. В. Боровская [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. 2008. № 2. С. 26–36. EDN IJUSQN.
8. Ломакин П. Д. Апвеллинг в Керченском проливе и прилегающей акватории Черного моря на базе контактных и спутниковых данных // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 2. С. 123–133. EDN VLPZBG. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-2-123-133>
9. Ломакин П. Д., Попов М. А. Крупномасштабный апвеллинг в районе Севастопольского взморья и его влияние на структуру и качество вод // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2021. № 4. С. 39–50. EDN AOSMHY. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-4-39-50>
10. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. URL: [http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij\\_rezhim\\_sevastopolskoj\\_buhty\\_2006.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf) (дата обращения: 10.05.2023).

Поступила 12.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 4.05.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

*Об авторах:*

**Ломакин Павел Демьянович**, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, профессор, **SPIN-код: 5419-9884, Researcher ID: V-7761-2017, Scopus Author ID: 6701439810, IstinaresearcherID (IRID): 18321047, p\_lomakin@mail.ru**

**Попов Марк Александрович**, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 4600-2656, Scopus Author ID: 57197871255, ORCID ID: 0000-0003-0220-1298, mark.a.popov@mail.ru**

*Заявленный вклад авторов:*

**Ломакин Павел Демьянович** – формулировка целей и задач исследования, анализ полученных результатов, их интерпретация, обсуждение результатов работы, написание статьи

**Попов Марк Александрович** – построение графиков, карт, качественный анализ результатов и их интерпретация, количественная обработка и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы, редактирование статьи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*