



Среда обитания водных биологических ресурсов

Роль пространственно-временной изменчивости температуры воды в динамике уловов хамсы в северо-западной части Чёрного моря

В.Н. Белоусов¹, М.М. Пятинский¹, В.А. Шляхов¹, С.Н. Кульба¹, К.К. Кивва²

¹ Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), ул. Береговая, 21 в, Ростов-на-Дону, 344002

² Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО»), Окружной проезд, 19, Москва, 105187

E-mail: pyatinskiymm@azniirkh.vniro.ru

SPIN-коды: В.Н. Белоусов – 4922–9136; М.М. Пятинский – 9500–3502; В.А. Шляхов – 9785–6939; С.Н. Кульба – 9179–1125; К.К. Кивва – 2978–5914

Цель работы: характеристика влияния температуры воды в Чёрном море на вылов анчоуса в северо-западной части Чёрного моря.

Материал и методы: работа основана на многолетних данных статистики вылова анчоуса и океанографических данных температуры поверхности моря в период 1992–2023 гг. по материалам проекта «Коперник». Проверка основной гипотезы о наличии связи между изменениями температуры воды и годовыми уловами европейского анчоуса выполнена методами кросс-корреляционного и пространственного корреляционного анализа.

Результат: показана значимая положительная связь между уловами анчоуса в северо-западной части Чёрного моря и температурой поверхности воды: среднегодовой (с задержкой в 1 год, $r_s = 0,50$) и среднезимней (без сдвига, $r_s = 0,42$) температурой. Установлены положительные тренды среднееголетних и среднезимних температур поверхности моря. Отмечено наличие значимых положительных пространственных корреляций между температурой воды и уловами анчоуса в ноябре – феврале, наиболее значимые в декабре – январе. Площади пространственных корреляций между температурой воды и уловами анчоуса увеличились в 2008–2021 гг. относительно 1993–2007 гг. Подтверждено наличие связи между индикатором климатических изменений (температурой воды) и параметрами рыболовства в северо-западной части Чёрного моря.

Новизна: статистический анализ многолетних данных позволил установить значимые пространственно-временные закономерности между параметрами промысла анчоуса и изменениями температуры воды.

Практическая значимость: установленные многолетние закономерности влияния изменений температуры воды на вылов анчоуса в северо-западной части Чёрного моря позволяют повысить эффективность организации и регулирования российского промысла.

Ключевые слова: Чёрное море, анчоус, температура воды, промысел, зимовальная миграция, климатические изменения.

Role of water temperature spatio-temporal variability in European anchovy catches dynamics in the northwestern Black Sea

Vladimir N. Belousov¹, Mikhail M. Piatinskii¹, Vladislav A. Shlyakhov¹, Sergey N. Kulba¹, Kirill K. Kivva²

¹ Azov-Black Sea branch of VNIRO («AzNIIRKH»), 21 v, Beregovaya st., Rostov-on-Don, 344002, Russia

² Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography («VNIRO»), 19, Okruzhnoy proezd, Moscow, 105187, Russia

The aim: to characterize the Black Sea water temperature influence on the anchovy fishing.

Methods: the assessment is based on long-term data of anchovy catch statistics and oceanographic data on water surface temperature during the period 1992–2023 by the Copernicus marine project. The main hypothesis about the relationship between changes in water temperature and annual catches of European anchovy was carried out by methods of cross-correlation and spatial correlation analysis.

Novelty: statistical analysis of long-term data allowed us to find significant spatio-temporal patterns between parameters of anchovy fishing and changes in water temperature.

Results: a significant positive relationship between anchovy catches in the northwestern part of the Black Sea and the water surface temperature is shown: the average annual (with a lag of 1 year, $r_s = 0,50$) and the average winter (without lag, $r_s = 0,42$) temperature. Positive trends of average annual and average winter sea surface temperatures have been described. There were significant positive spatial correlations between water temperature and anchovy catches in November-February, the most significant in December-January. The areas of spatial correlations between water temperature and anchovy catches increased in period 2008–2021 relative to 1993–2007. The existence of a relationship between the indicator of climate change (water temperature) and fishing parameters in the northwestern part of the Black Sea has been confirmed.

Practical significance: the established long-term correlation patterns between changes in water temperature and the parameters of anchovy fishing in the northwestern part of the Black Sea allows to increase the efficiency and sustainability of Russian fisheries in these waters.

Keywords: Black Sea, anchovy, water temperature, fisheries, overwintering migration, climate changes.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних 100 лет наблюдается глобальное потепление, которое, по мнению ряда авторов, имеет антропогенную природу [Adedeji et al., 2014; Pecl et al., 2017]. Повышение температуры Мирового океана началось несколько позже, чем изменения в атмосфере, — с 60-х гг. прошлого века [Yao et al., 2017] и сопровождается существенными перестройками структуры морских биогеоценозов.

Изменения структурной организации биогеоценозов Чёрного моря происходят на фоне глобальных климатических изменений и возрастающей антропогенной нагрузки (зарегулирование рек, сокращение материкового стока из-за его использования для нужд промышленности и сельского хозяйства, рост интенсивности рыболовства и др.) [Oğuz, Öztürk, 2011; Micheli et al., 2013; Зуев, 2019 а; Казанкова, 2020].

Начиная с середины XX века, основным объектом промышленного рыболовства в Чёрном море является европейский анчоус (хамса) *Engraulis encrasicolus* (L., 1758), разделяемый на два подвида (расы) — черноморский (черноморская хамса *E. e. ponticus* Aleksandrov, 1927) и азовский (азовская хамса *E. e. maeoticus* Pusanov, 1926). Их нерестовые ареалы географически разобщены — у азовской хамсы нерест происходит почти исключительно в Азовском море, черноморская хамса нерестится в Чёрном море, его северо-западная часть (СЗЧМ) играет важнейшую роль в воспроизводстве анчоуса. Существование двух популяций (единиц запаса) европейского анчоуса в Чёрном море и возможной их гибридизации признаётся большинством исследователей, хотя споры об их таксономическом (видовом/внутривидовом) статусе ведутся до сих пор [Chashchin et al., 2015; Зуев, 2019 б; Bonhomme et al., 2022].

Промысел европейского анчоуса в Чёрном море происходит, главным образом, активными орудиями лова (кошельковыми неводами, близнецовыми и разноглубинными тралями) на местах его зимовки, а также при облове косяков рыбы во время нерестовых и зимовальных миграций. Зимовальные ареалы обоих подвигов анчоуса расположены в Чёрном море, при этом основные места зимовки менее теплолюбивого азовского подвида локализованы в северной половине моря у кавказского побережья Краснодарского края, где за всю историю наблюдений отмечен всего один достоверный случай массовой зимовки более теплолюбивого черноморского подвида — в феврале-марте 2019 г. У берегов Крыма зимуют и черноморский, и азовский подвиды, которые со времён бывше-

го СССР являются разными единицами промыслового регулирования.

Со II половины 1990-х гг. и по настоящее время (исключая кратковременный период 2014–2018 гг., в котором по разным причинам промысловый флот в зимние месяцы у западного побережья Крыма практически не работал) уловы европейского анчоуса СЗЧМ демонстрируют устойчивую тенденцию роста, тогда как в целом по региону Чёрного моря такая тенденция не прослеживается. Ранее была выявлена зависимость эффективности промысла шпрота от синоптической изменчивости температуры поверхности Чёрного моря [Панов и др., 2020]. В данной работе одним из путей выяснения причин такой динамики вылова европейского анчоуса в Чёрном море является изучение взаимосвязи уловов анчоуса с изменениями климата, отражающимися в пространственных изменениях температуры воды.

Целью данного исследования является проверка гипотезы о наличии связи между повышением температуры воды в Чёрном море и показателями улова европейского анчоуса в северо-западной его части в 1992–2023 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Формирование непрерывного ряда многолетних показателей годового вылова европейского анчоуса в СЗЧМ за 1992–2013 гг. произведено по материалам фондовых данных «ЮГНИРО», которые в настоящее время содержатся в Азово-Черноморском филиале ФГБНУ «ВНИРО» в виде выписок из статистических отчётов бассейновых управлений рыбоохраны Госрыбгагентства Украины, для 2000–2017 гг. — из публикации [Кожурин и др., 2018]. Российский вылов хамсы в 2014–2023 гг. сформирован из сводок Азово-Черноморского территориального управления Росрыболовства, по итогам расовой идентификации крымских уловов, из украинских сводок Госрыбгагентства мелиорации и рыбного хозяйства Украины за 2016–2022 гг. Для 2014 и 2015 гг. украинские уловы в СЗЧМ вычислены как разность между общим выловом анчоуса в Азовском и Чёрном морях, содержащимся в статистике ФАО [FAO, 2023], и выловом Украины непосредственно в Азовском море, сведения о котором представляла Украина в Российско-Украинскую комиссию.

В качестве индикатора климатических изменений использовались ежемесячные усреднённые пространственно-временные данные о температуре поверхностного слоя моря (далее — ТПМ) из реанализа Чёрного моря (Мониторинговый морской сервис «Коперник») за 1993–2021 гг. [Lima et al., 2020].

Тестирование гипотезы о наличии связи между температурой воды в Чёрном море и уловами хамсы в северо-западной части моря выполнено при помощи непараметрического кросс-корреляционного теста Спирмена между показателями среднегодовой (среднее значение ТПМ за период январь – декабрь), среднезимней (среднее значение ТПМ за декабрь прошедшего года, январь – февраль текущего года) температуры поверхности воды и величиной годового улова [Artusi et al., 2002]:

$$r_s = \frac{6 \sum (R(X_i) - R(Y_i))^2}{n(n^2 - 1)},$$

где $R(X_i)$ и $R(Y_i)$ – кодированные ранговые целочисленные значения исходных значений рядов x_i и y_i , соответственно; n – количество элементов временного ряда.

Выбор непараметрического теста обусловлен наличием значимых отклонений рядов данных от нормального закона распределения, что является основным требованием для применения параметрических методов тестирования гипотез [Bishara, Hittner 2012].

Анализ многолетних изменений ТПМ выполнен путём визуализации в пространстве и во времени коэффициента уклона k линии тренда:

$$f(sst) = k \times sst + c,$$

в результате построения линейной регрессии методом наименьших квадратов для значений ТПМ в период 1993–2022 гг. Дополнительно к определению тренда выполнен анализ аномалий значений ТПМ относительно его среднего значения:

$$V = \frac{1}{n} \sum (sst_i - \overline{sst}),$$

где sst_i – значение ТПМ в год i ; \overline{sst} – среднее значение ТПМ за все годы n .

Для лаконичности текста и повышения его доступности вместо определения «среднегодовая ТПМ» и «среднезимняя ТПМ» при выполнении анализа по вектору времени в тексте статьи используются определения «годовая ТПМ» и «зимняя ТПМ», соответственно.

Для тестирования пространственных связей между величинами годовых уловов и сезонными колебаниями температуры выполнен корреляционный тест Спирмена. Расчёт пространственных корреляций выполнен в несколько шагов. На первом этапе исходные пространственно-временные матрицы значений ТПМ из файлов данных проекта «Коперник» со стандартным разрешением $0,037^\circ \times 0,028^\circ$ были перенесены на более «грубую» стационарную сетку с разрешени-

ем $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Перенос на стационарную сетку выполнен методом билинейной интерполяции [Kirkland, 2010].

На втором этапе выполнялось вычисление среднегодовых (среднезимних) значений в каждой точке стационарной сетки в Чёрном море для периода 1993–2021 гг. На следующем этапе выполнялся расчёт коэффициента корреляции Спирмена r_s и его уровня значимости p между значениями ТПМ в каждой точке за каждый отдельный месяц относительно величины годового вылова хамсы в северо-западной части Чёрного моря. На завершающем этапе выполнялась визуализация полученных пространственных значений корреляций r_s в соответствии с принятой шкалой значимости [Kumar, Reddi, 2023]:

а) $-1 \leq r_s < -0,8$ и $+0,8 < r_s \leq +1$ – сильная отрицательная или положительная связь соответственно,

б) $-0,8 \leq r_s < -0,6$ и $+0,6 < r_s \leq +0,8$ – умеренная отрицательная или положительная связь соответственно,

в) $-0,6 \leq r_s \leq -0,4$ и $+0,4 \leq r_s \leq +0,6$ – слабая отрицательная или положительная связь соответственно,

г) $-0,4 < r_s < +0,4$ – незначимая связь в соответствии с критерием уровня значимости $\alpha = 0,05$ при $df = 25$.

При выполнении пространственного корреляционного анализа на усечённых данных временных рядов уровень значимой корреляции r_s при $\alpha = 0,05$ смещался до $|r_s| = 0,49$.

Обработка входных данных выполнена в среде R при помощи пакетов *sf*, *raster*, *rasterVis*, *tidyverse* [Pebesma, Bivand, 2023], программный код проекта опубликован в открытом доступе на площадке СберТех¹, пример данных для анализа представлен в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В 1980–1988 гг. уловы европейского анчоуса в регионе Чёрного моря (общечерноморский улов черноморского и азовского подвидов) находились на максимальном уровне за всю историю промысла, изменяясь в диапазоне от 401 до 606 тыс. т, а после вспышки мнемипсиса в 1989–1992 гг. произошло резкое уменьшение объёмов добычи анчоуса до 99–163 тыс. т [FAO, 2023; 2024], известное как «коллапс» анчоуса и в целом черноморского рыболовства [Гребневик ..., 2000]. Основными причинами «коллапса» разными авторами назывались: чрезмерный промысел, эвтрофикация, разрушение гребневиком-мнемипсисом

¹ https://gitverse.ru/anchovy_phd/anchovy-spatiotemporal-sst

Таблица. Пример входных данных для пространственного кросс-корреляционного анализа между среднемесячными значениями ТПМ и годовыми уловами европейского анчоуса в СЗЧМ

Table. Input data example for spatial cross-correlation analysis between averaged monthly SST and European anchovy catches in the NWBS

| Год | Улов СЗЧМ, т | Январь | | | Февраль | | | ... |
|------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|-----|---------------------------------|-------------------------------|-----|-----|
| | | ТПМ в 37,920001 41,010001 | ТПМ в 38,020001 41,010001 | ... | ТПМ в 37,920001 41,010001 | ТПМ 38,020001 41,010001 | ... | |
| 1993 | 1598 | 7,51 | 7,53 | ... | 5,88 | 5,95 | ... | ... |
| 1994 | 242 | 8,76 | 8,79 | ... | 7,29 | 7,33 | ... | ... |
| 1995 | 888 | 9,39 | 9,41 | ... | 7,82 | 7,85 | ... | ... |
| 1996 | 596 | 8,74 | 8,77 | ... | 7,3 | 7,28 | ... | ... |
| 1997 | 3623 | 10,24 | 10,25 | ... | 7,71 | 7,74 | ... | ... |
| 1998 | 1039 | 9,18 | 9,22 | ... | 7,72 | 7,76 | ... | ... |
| 1999 | 938 | 10,06 | 10,11 | ... | 8,51 | 8,54 | ... | ... |
| 2000 | 2442 | 9,19 | 9,27 | ... | 8,33 | 8,34 | ... | ... |
| 2001 | 2161 | 10,5 | 10,52 | ... | 9,05 | 9,06 | ... | ... |
| 2002 | 2974 | 8,13 | 8,21 | ... | 7,29 | 7,29 | ... | ... |
| 2003 | 4488 | 9,39 | 9,41 | ... | 7,92 | 7,95 | ... | ... |
| 2004 | 1430 | 9,56 | 9,6 | ... | 7,81 | 7,85 | ... | ... |
| 2005 | 1612 | 10,62 | 10,63 | ... | 8,59 | 8,62 | ... | ... |
| 2006 | 4907 | 9,28 | 9,31 | ... | 7,41 | 7,45 | ... | ... |
| 2007 | 3318 | 9,54 | 9,58 | ... | 8,51 | 8,58 | ... | ... |
| 2008 | 3761 | 9,06 | 9,14 | ... | 7,28 | 7,35 | ... | ... |
| 2009 | 4560 | 10,11 | 10,16 | ... | 9,25 | 9,24 | ... | ... |
| 2010 | 5051 | 11,08 | 11,12 | ... | 9,14 | 9,17 | ... | ... |
| 2011 | 6932 | 11,02 | 11,12 | ... | 9,05 | 9,08 | ... | ... |
| 2012 | 6823 | 9,78 | 9,85 | ... | 7,78 | 7,82 | ... | ... |
| 2013 | 1686 | 10,28 | 10,32 | ... | 8,98 | 8,99 | ... | ... |
| 2014 | 424 | 10,8 | 10,89 | ... | 9,31 | 9,3 | ... | ... |
| 2015 | 642 | 10,05 | 10,07 | ... | 8,79 | 8,83 | ... | ... |
| 2016 | 339 | 10,3 | 10,34 | ... | 9,12 | 9,18 | ... | ... |
| 2017 | 142 | 9,32 | 9,34 | ... | 7,49 | 7,62 | ... | ... |
| 2018 | 83 | 11,42 | 11,48 | ... | 10,01 | 10,12 | ... | ... |
| 2019 | 6707 | 10,03 | 10,09 | ... | 8,91 | 8,93 | ... | ... |
| 2020 | 7628 | 11,4 | 11,41 | ... | 9,52 | 9,55 | ... | ... |
| 2021 | 7871 | 12,26 | 12,27 | ... | 10,49 | 10,5 | ... | ... |

нижних трофических уровней черноморской экосистемы [Grishin et al., 2005; Chashchin et al., 2015].

С последнего года коллапса (1992 г.), вплоть до настоящего времени, общечерноморские уловы анчоуса колебались в диапазоне от 137 до 418 тыс. т испытывая периоды спадов и подъёмов, в целом для 1992–2023 гг. без какого-либо тренда (рис. 1 а).

При рассмотрении более коротких временных отрезков, рис. 1, в динамике общечерноморских уловов условно выделены несколько периодов с различными уровнями средних уловов. Первый период низких общечерноморских уловов (среднегодовой улов

253,8 тыс. т) в 1992–1994 гг. демонстрировал хорошо выраженную положительную динамику за счёт работы турецкого рыболовецкого флота, поскольку совпал с окончанием коллапса и начальной фазой восстановления запаса анчоуса после упомянутого выше катастрофического падения его численности и вылова. В этот период средний вылов европейского анчоуса СЗЧМ также был низким (1,5 тыс. т), основу уловов составлял вылов Украины. Однако, в отличие от роста общечерноморских уловов, тренд годовых уловов Украины был отрицательным из-за экономических трудностей в первые годы после развала СССР.

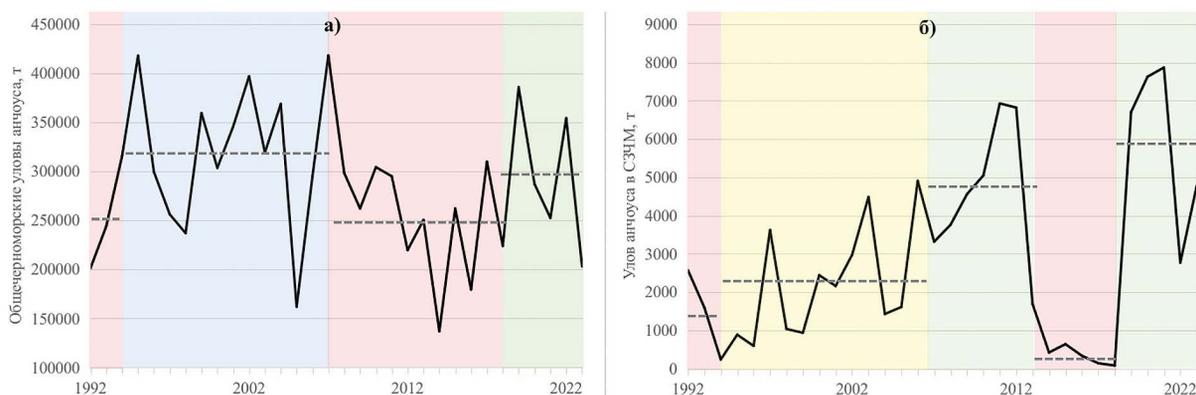


Рис. 1. Многолетняя динамика вылова европейского анчоуса в Чёрном море: а) — общечерноморский вылов по данным статистики FAO [FAO, 2023, 2024]; б) — вылов в северо-западной части моря. Пунктирными линиями показаны средние уловы за экспертно-выделенные периоды (красным цветом — период низких уловов, зелёным цветом — период высоких уловов, жёлтым цветом — период средних уловов, синим цветом — период сверхвысоких уловов)

Fig 1. Long-term dynamics of European anchovy catch in the Black Sea: а) — the total Black Sea catch according to FAO statistics [FAO, 2023, 2024]; б) — catch in the northwestern Black Sea. Dashed lines mark average catches during expert defined periods (red color area — low catches period, green color — high catches period, yellow color — medium catches period, blue color — extremely high catches period)

В последующий период 1995–2007 гг., по мере дальнейшего улучшения состояния запасов анчоуса, связанного с уменьшением промысловой нагрузки и вселением в Чёрное море гребневика брое *Beroe ovata* Bruguière, 1789, произошло увеличение общечерноморских уловов (среднегодовой улов 321,4 тыс. т), которые, однако, испытывали значительные межгодовые колебания. В данный период отмечен отчётливо выраженный положительный тренд годовых уловов анчоуса СЗЧМ и рост среднегодового вылова до 2,4 тыс. т.

В период 2008–2018 гг. отмечено значительное снижение среднего показателя общечерноморского вылова до 249,2 тыс. т, при этом падение годовых уловов в начале периода после 2014 г. сменилось их ростом. В СЗЧМ положительный тренд годовых уловов анчоуса сохранялся по 2012 г. (в 2008–2013 гг. средний годовой вылов составлял 4,8 тыс. т), после которого до конца рассматриваемого периода его знак был противоположным, а вылов анчоуса резко упал. В 2014–2018 гг. среднегодовой вылов в СЗЧМ равнялся 0,3 тыс. т, являясь минимальным за 30 лет наблюдений. Причиной такого провала в значительной степени стали организационные трудности с ведением рыбного промысла крымскими рыбодобывающими предприятиями в 2014 г. в условиях так называемого «переходного периода» после вхождения Республики Крым в состав Российской Федерации. Дополнительным фактором снижения уловов в эти годы было то, что начиная с 2015 г. крымский рыболовный флот получил возможность вылавливать анчоуса разноглубинными травами у берегов Краснодарского края,

в результате чего часть промыслового флота перешла из СЗЧМ к кавказскому побережью.

В период 2019–2023 гг. общечерноморские уловы и уловы в СЗЧМ продемонстрировали значительную тенденцию их увеличения (средний общечерноморский улов — 296,4 тыс. т, средний улов в СЗЧМ — 5,9 тыс. т). При этом средний вылов анчоуса в этом районе стал самым высоким после 1992 г. Некоторый спад уловов в СЗЧМ в 2022 и 2023 гг. относительно их уровня в 2019–2021 гг. можно объяснить существенными помехами для рыболовства вследствие ограничений мореплавания в северо-западной части Чёрного моря с февраля 2022 г.

Выполненный анализ динамики уловов европейского анчоуса в 1992–2023 гг. свидетельствует о чередовании периодов роста и снижения общечерноморских уловов без каких-либо тенденций к увеличению в целом для рассматриваемого периода после вспышки гребневика мнемипсиса. Динамика же уловов в СЗЧМ характеризуется наличием явно выраженного тренда к их росту.

В соответствии с работой [Chashchin, 1996] зимовальная миграция европейского анчоуса из мест нереста и нагула в СЗЧМ происходит поздней осенью по градиентам температур вдоль побережья Болгарии, Румынии в сторону тёплых вод на юго-востоке Чёрного моря (турецкие и грузинские акватории). Реже (или для меньшей доли анчоуса, который нагуливался в СЗЧМ) миграция к основным местам зимовки происходит с декабря через акватории вблизи крымского полуострова: из северо-западной части Чёрного моря до м. Сарыч и далее через открытую часть моря

в его южную часть [Chashchin et al., 2015]. В некоторых случаях часть скоплений европейского анчоуса, мигрирующего из СЗЧМ, зимует в акватории крымского шельфа, причём, в 2020–2023 гг. западная граница распределения зимовальных скоплений стала проходить по м. Меганом.

Высокие уловы европейского анчоуса в северо-западной части Чёрного моря в зимний период в 2019–2023 гг. могут быть обусловлены множеством факторов, среди которых важную роль могут составлять климатические изменения. Вероятно, периоды роста показателей уловов анчоуса в СЗЧМ могут быть обусловлены повышением температуры воды в Чёрном море за последние 30 лет.

Результаты выполнения многолетнего кросс-корреляционного анализа между ТПМ и уловами хамсы в северо-западной части моря представлены на рис. 2. Значимая положительная связь выявлена между годовыми показателями ТПМ и уловами анчоуса в СЗЧМ со сдвигом на 1 год, $r_s = 0,50$ и между зимними показателями ТПМ и уловами анчоуса в СЗЧМ без сдвига: $r_s = 0,42$.

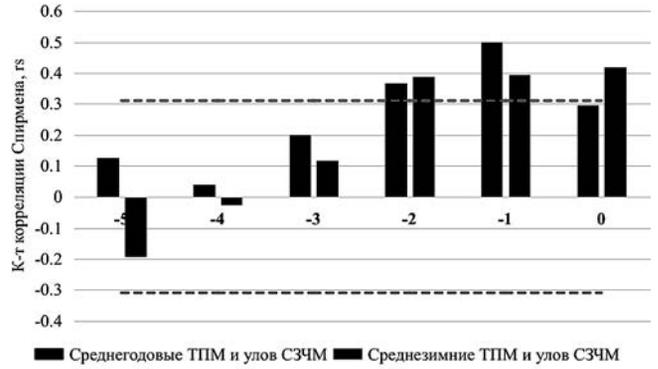


Рис. 2. Кросс-корреляционный тест Спирмена между годовыми и зимними показателями ТПМ Чёрного моря и величиной годового вылова европейского анчоуса в СЗЧМ
Fig. 2. Spearman's cross-correlation test between annual and winter SST of the Black Sea water and the value of the annual catch of European anchovy in the NWBS

Анализ многолетних трендов ТПМ для всего Чёрного моря и основных акваторий СЗЧМ, через которые осуществляется зимовальная миграция анчоуса и в которых осуществляется основной промысел, представлен на рис. 3. Многолетняя динамика ТПМ

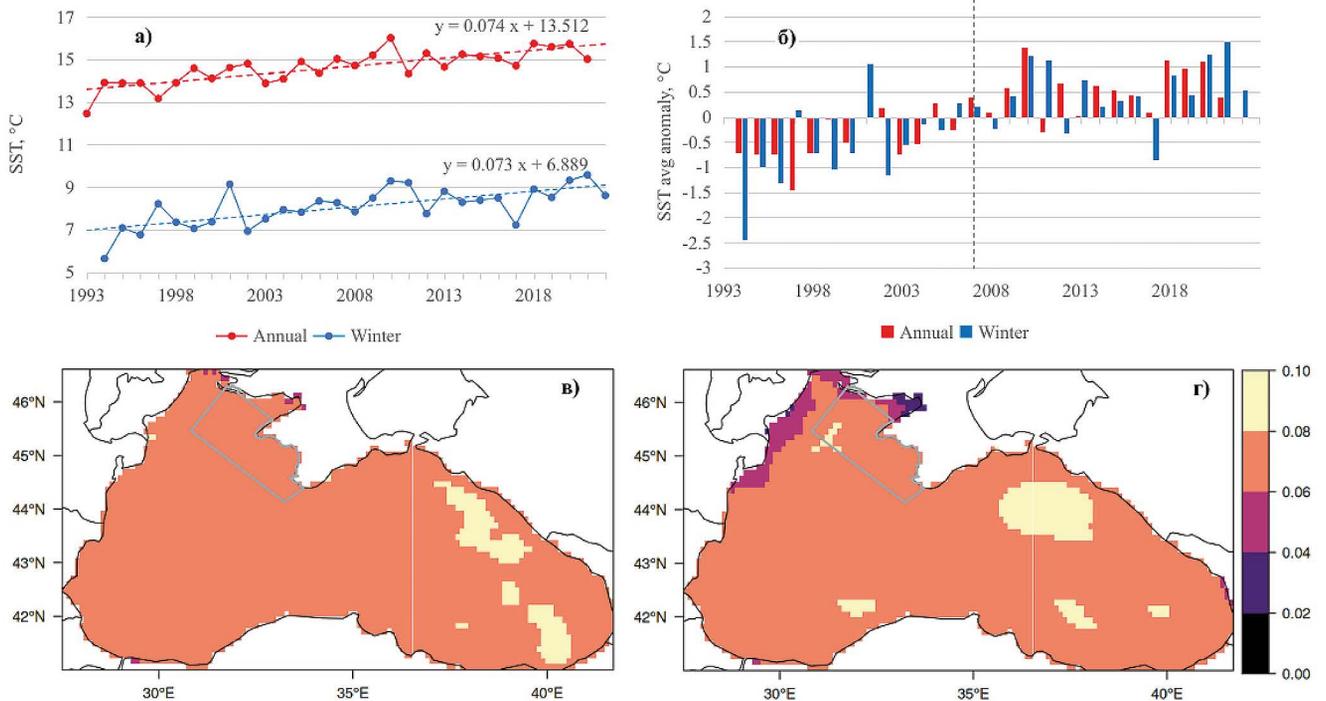


Рис. 3. а) – среднегодовая (Annual) и среднезимняя (Winter) динамика показателей ТПМ и линейные тренды ТПМ; б) – среднегодовые (Annual) и среднезимние (Winter) аномалии ТПМ (пунктирной линией обозначен переход от многолетних отрицательных к положительным аномалиям ТПМ в 2007 г.); в) среднегодовые показатели уклона тренда динамики ТПМ; г) среднезимние показатели уклона тренда динамики ТПМ. Средние значения ТПМ и их аномалии (рис. а, б) рассчитаны для основных акваторий миграции и промысла анчоуса в СЗЧМ, отмеченные серым полигоном на картах (рис. в, г)

Fig. 3. а) long-term annual and winter SST dynamics and trends; б) long-term SST annual and winter average anomalies (dashed line indicates shift from long-term negative to positive anomalies in 2007); в) annual SST spatial linear trend slope; г) winter SST spatial linear trend slope. The average values of SST and their anomalies (fig. а, б) are calculated for the main areas of anchovy migration and fishing in the NWBS, marked with a gray polygon on the maps (fig. в, г)

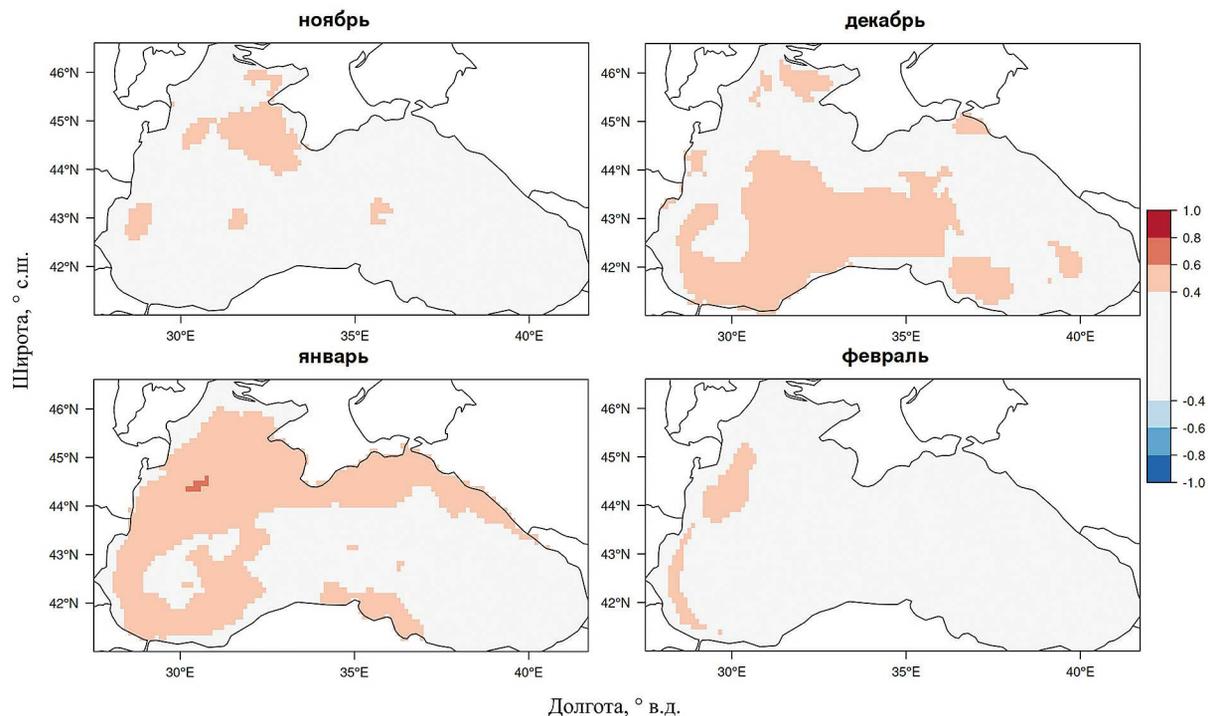


Рис. 4. Пространственные корреляции (Спирмена) между среднемесячной температурой поверхности воды в Чёрном море и годовыми уловами европейского анчоуса в СЗЧМ в период 1993–2021 гг.

Fig. 4. Spatial correlations (Spearman's) between monthly average water surface temperature in the Black Sea and the annual catches of European anchovy in the NWBS during the period 1993–2021

характеризуется устойчивым ростом показателей температуры воды в среднем на $+0,074$ °C в год. Повышение ТПМ в данный период было относительно равномерным для всех акваторий моря, за исключением некоторых юго-восточных акваторий и места впадения крупных рек (Дунай, Днестр) в отдельных акваториях в СЗЧМ.

Расчёт и визуализация пространственных полей корреляций между многолетними среднемесячными показателями ТПМ и уловами анчоуса в северо-западной части моря представлены на рис. 4. Значимая положительная связь между ТПМ и уловами анчоуса отмечена для периода ноябрь – февраль, в период март – октябрь значимые поля корреляций отсутствовали. Наиболее высокие площади пространственных корреляций, явно не являющиеся артефактами анализа, отмечены в декабре и январе. Связь между годовыми уловами анчоуса и средней ТПМ в период март – октябрь незначима.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленная положительная взаимосвязь между температурой воды и величинами уловов анчоуса в СЗЧМ ранее многократно отмечена при описании

физиологических и поведенческих реакций анчоуса: температурный фактор является определяющим для начала нерестовой и зимовальной миграций, формирования и рассеивания плотных скоплений анчоуса [Гришин, 2014; Chashchin et al., 2015; Панов и др., 2022]. Выявленная закономерность (рис. 2) вероятнее всего характеризует положительную связь между особенностями зимовальной миграции анчоуса из северо-западной части моря в южную и юго-восточную его часть с температурой воды, и в среднегодовом представлении проявляется со сдвигом на 1 год, а при рассмотрении только зимних температур – в этот же год.

Следует отметить, что сам по себе корреляционный тест лишь устанавливает силу и направленность связи, но не позволяет судить о причинно-следственных отношениях. Хорошо известно явление «ложной корреляции», когда прямое взаимодействие между коррелирующими величинами отсутствует, но есть взаимодействие с неизвестным фактором-посредником. В нашем случае таким неучтённым фактором может быть обилие корма или численность хищников, которые зависят от температуры воды.

Данную особенность корреляционного анализа, в том числе в пространственном представлении, сле-

дует учитывать при интерпретации полученных результатов. Полученные значимые коэффициенты корреляции и пространственные связи не обязательно указывают на то, что именно изменение температуры воды в этих акваториях напрямую приводило к изменению годового улова, а лишь указывает на то, что между годовыми уловами и ТПМ в этих акваториях имеется связь, характеризующая эту закономерность. Поэтому следует отчётливо понимать «вероятностную» природу биологического объяснения обнаруженных закономерностей.

Наиболее значимые пространственные корреляции между ТПМ и уловами в СЗЧМ отмечены в декабре и январе (рис. 2). В декабре слабая положительная взаимосвязь отмечена преимущественно для южной части моря и на акваториях северо-западной части моря. В январе слабая положительная связь отмечена для акваторий, прилегающих к крымско-кавказской шельфовой зоне и западной части Чёрного моря.

Для биологического объяснения сезонных взаимосвязей между показателями температуры воды и уловами в СЗЧМ следует обратить внимание на особенности зимовальной миграции анчоуса (рис. 5). В соответствии с работой [Chashchin, 1996] на основе данных 1980–1988 гг. зимовальная миграция скоплений анчоуса из СЗЧМ происходит преимущественно вдоль акваторий болгарского и румынского шельфа в юго-восточную часть Чёрного моря, а также реже через открытую часть моря через крымский шельф

в юго-восточную часть моря. Другое современное исследование [Guraslan et al., 2017] свидетельствует в пользу того, что зимовальная миграция хамсы из северо-западной части моря может происходить вдоль западного побережья Крымского полуострова в открытую часть моря и напрямую в юго-восточные акватории (направление № 1, 3 на рис. 4). Такое заключение авторы сделали на основе Лагранжевой модели на данных 2001–2003 гг. относительно ранее описанного направления миграции вдоль Болгарского и Румынского шельфа по данным 1980–1988 гг. При этом авторы отмечают, что возможность такой миграции (по направлениям № 1, 3) вероятнее всего обуславливается изменениями температуры воды уже в 2001–2003 гг.

Возможность зимовальной миграции анчоуса из СЗЧМ через акватории шельфовой части крымского полуострова в последующих работах отмечена и А.К. Чащиным с соавторами [Chashchin et al., 2015]. По их мнению, такая миграция является возможной, как и зимовка анчоуса в акваториях, прилегающих к Крымскому полуострову. Однако авторы отмечают, что эволюционно закрепилась особенность зимовки анчоуса и его зимовальная миграция из СЗЧМ в более тёплые южные акватории. Причиной этому послужили случившиеся возникновение летальных температур воды в зимние месяцы в акваториях, прилегающих к крымскому полуострову, что не способствовало закреплению признака.

По всей видимости, увеличение уловов анчоуса в СЗЧМ в зимние месяцы (декабрь, январь) в значи-

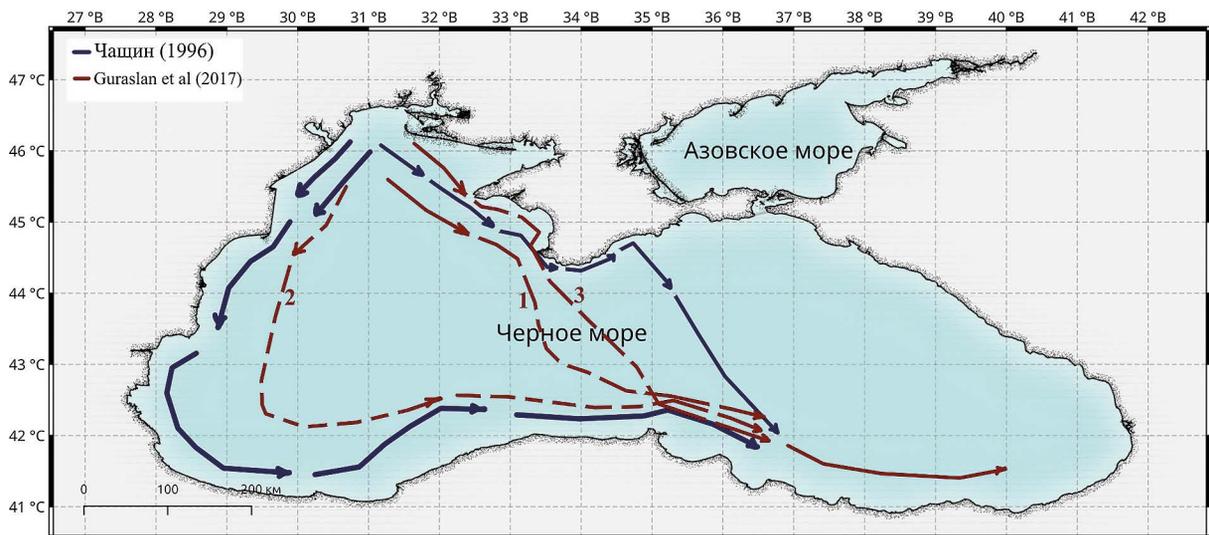


Рис. 5. Схема зимовальной миграции черноморской хамсы по Chashchin [1996] и Guraslan et al. [2017]. Цифрами отмечены направления зимовальной миграции

Fig. 5. Black Sea anchovy overwintering migration scheme according to Chashchin [1996] and Guraslan et al. [2017]. The numbers indicate the directions of overwintering migration

тельной мере связано и обусловлено повышением ТПМ в 1993–2022 гг. (рис. 3), что отмечается в виде положительных пространственных корреляций на рис. 4. Увеличение годового вылова в зимние месяцы косвенно свидетельствует об увеличении численности анчоуса в этих акваториях в зимние месяцы. Увеличение численности и уловов анчоуса в СЗЧМ в зимние месяцы с биологической точки зрения могло стать результатом повышения температуры воды, в том числе в зимние месяцы (см. рис. 3 г), что сделало возможным зимовку части мигрирующих особей в акваториях крымской шельфовой зоны.

Возможность осуществления зимовки анчоуса, в нетипичные для этого биологического цикла акватории западной части крымского шельфа, может быть обусловлена снижением частоты проявления отрицательных аномалий зимних температур. С 2007 г. значительные отрицательные аномалии зимних ТПМ отмечены в 2012 и 2017 гг. (рис. 3 б).

Свидетельством в пользу увеличения численности анчоуса в СЗЧМ в зимние месяцы в результате климатических изменений является выявленное нами различие пространственных корреляций между уловами и ТПМ в период 1993–2007 гг. и период 2008–2022 гг., показанное на рис. 6. Выбор интервалов временных

отрезков обусловлен изменением тенденции многолетних аномалий от отрицательных значений (1993–2007 гг.) к положительным (в 2008–2022 гг.) (рис. 3 б).

В период 1993–2007 гг. значимые слабые положительные взаимосвязи отмечены только в январе для отдельных акваторий в северо-западной части моря вблизи крымской шельфовой зоны.

Для периода 2008–2022 гг. наблюдается расширение районов со значимой корреляцией как в пространстве, так и во времени. В этот период значимые положительные корреляции характерны для северо-западных, западных районов моря и акваторий крымской шельфовой зоны в декабре и январе – они охватывают практически весь период зимовальной миграции анчоуса.

ВЫВОДЫ

1. В 1992–2023 гг. динамика уловов европейского анчоуса в регионе Чёрного моря характеризовалась чередованием периодов подъёма и спадов общечерноморских уловов без какой-либо тенденции к увеличению, тогда как в северо-западной части моря наблюдался явно выраженный тренд к росту вылова.

2. Между температурой поверхности воды Чёрного моря и годовыми уловами анчоуса в северо-

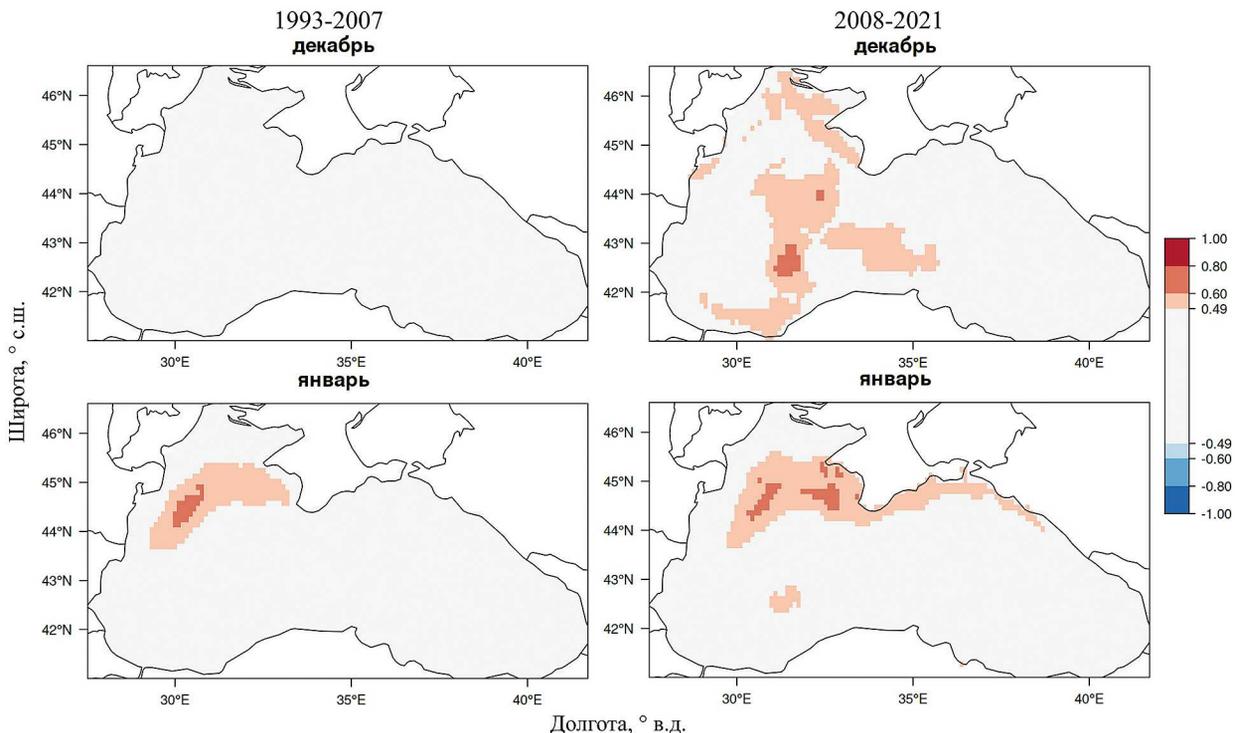


Рис. 6. Пространственные корреляции между годовыми уловами анчоуса в СЗЧМ и температурой поверхности воды раздельно в периоды: 1993–2007 гг. и 2008–2022 гг.

Fig. 6. Spatial correlation between anchovy annual catches in the NWBS and sea surface temperature separately for the periods 1993–2007 and 2008–2022

западной части моря существует значимая взаимосвязь. Пространственная корреляция между температурой поверхности воды и годовыми уловами анчоуса в северо-западной части Чёрного моря характеризуется пространственно-временной неоднородностью.

3. Наиболее значимые пространственные корреляции между температурой поверхности воды и уловами анчоуса в северо-западной части Чёрного моря отмечены в декабре и январе.

4. Наиболее сильные взаимосвязи обнаружены между годовыми уловами анчоуса в северо-западной части Чёрного моря и температурой поверхности воды на крымском шельфе и в акваториях западной части Чёрного моря.

5. Период 2008–2022 гг. в сравнении с периодом 1993–2007 гг. характеризуется более сильной пространственной корреляцией между годовыми уловами анчоуса в северо-западной части Чёрного моря и температурой поверхности воды.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Азово-Черноморского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») по теме исследований «Характеристика влияния климатических процессов в черноморском регионе на состояние запасов и вылов основных объектов регионального рыболовства».

ЛИТЕРАТУРА

- Гребневик *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassis) в Азовском и Чёрном морях: биология и последствия вселения. 2000. / С.П. Волков ред. Ростов-на-Дону: БКН. 500 с.
- Гришин А.Н. 2014. Особенности формирования зимовальных скоплений хамсы (*Engraulis encrasicolus*) у восточного побережья Крыма // Морской экологический журнал. Т. 13. № 1. С. 9–16.
- Зуев Г.В. 2019 а. Современное состояние популяции хамсы *Engraulis encrasicolus* (L.) (Pisces: Engraulidae), зимующей у побережья восточного Крыма и северного Кавказа // Морской биологический журнал. Т. 4. № 3. С. 56–68.
- Зуев Г.В. 2019 б. Современная популяционная структура европейского анчоуса *Engraulis encrasicolus* L. (Engraulidae: Pisces) в Чёрном и Азовском морях и история её формирования // Морской биологический журнал. Т. 4. № 1. С. 45–62.
- Казанкова И.И. 2020. Влияние повышения температуры поверхностного слоя моря на потенциальную популяционную емкость мидии у берегов юго-западного Крыма // Системы контроля окружающей среды. № 3. С. 133–138.
- Кожурин Е.А., Шляхов В.А., Губанов Е.П. 2018. Динамика уловов промысловых рыб Крыма в Чёрном море // Труды ВНИРО. Т. 171. С. 157–169.
- Панов Б.Н., Смирнов С.С., Спиридонова Е.О., Негода С.А. 2022. Оценка условий осенней миграции черноморской хамсы к берегам Крыма в 2019 и 2020 годах по данным с ИСЗ // Исследование земли из космоса. № 6. С. 63–73.
- Панов Б.Н., Спиридонова Е.О., Пятинский М.М., Стыцук Д.Р. 2020. О роли температурного фактора в поведении и эффективности промысла черноморского шпрота // Водные биоресурсы и среда обитания. Т. 3, № 1. С. 106–113.
- Adedeji O., Reuben O., Olatoye O. 2014. Global climate change // Journal of Geoscience and Environment Protection. V. 2. Iss. 2. P. 115–125.
- Artusi R., Verderio P., Marubini E. 2002. Bravais-Pearson and Spearman correlation coefficients: meaning, test of hypothesis and confidence interval // The International journal of biological markers. V. 17. Iss. 2. P. 148–151.
- Bishara A.J., Hittner J.B. 2012. Testing the significance of a correlation with nonnormal data: comparison of Pearson, Spearman, transformation, and resampling approaches // Psychological methods. V. 17. Iss. 3. P. 399.
- Bonhomme F., Arbidol C., Bănanu D, Bahri-Sfar L., Fadhlouid Zid K., Strelkov P., Arculeo M., Soulier L., Quignard J-P. 2022. Systematics of European coastal anchovies (genus *Engraulis* Cuvier) // Journal of Fish Biology. V. 100. Iss. 2. P. 594–600.
- Chashchin A.K. 1996. The Black Sea populations of anchovy // Scientia Marina. V. 60. P. 219–225.
- Chashchin A., Shlyakhov V., Dubovik V., Negoda S. 2015. Stock Assessment of Anchovy (*Engraulis encrasicolus* L) in Northern Black Sea and Sea of Azov // Progressive Engineering Practices in Marine Resource Management. P. 209–243.
- FAO. 2023. The State of Mediterranean and Black Sea Fisheries 2023 – Special edition. General Fisheries Commission for the Mediterranean. Rome. 52 p.
- FAO. 2024. Fishery and Aquaculture Statistics – Yearbook 2021. Rome. 232 p.
- Grishin A., Daskalov G., Shlyakhov V., Mihneva V. 2007. Influence of gelatinous zooplankton on fish stocks in the Black Sea: analysis of biological time-series // Marine Ecological Journal. V. 6. Iss. 2. P. 5–24.
- Guraslan C., Fach B.A., Oguz T. 2017. Understanding the impact of environmental variability on anchovy overwintering migration in the Black Sea and its implications for the fishing industry // Frontiers in Marine Science. V. 4. P. 1–24.
- Kirkland E.J. 2010. Bilinear interpolation // Advanced computing in electron microscopy. P. 261–263.

- Kumar K.P., Reddi V. 2023. Significance of Spearman's Rank Correlation Coefficient // International Journal For Multidisciplinary Research. V. 5. Iss. 4. P. 1–4.
- Le Traon P.Y., Reppucci A., Alvarez F.E., Aouf L., Behrens A., et al. 2019. From observation to information and users: the Copernicus Marine Service perspective // Frontiers in Marine Science. V. 6. 234 p.
- Lima L., Masina S., Ciliberti S.A., Peneva E.L., Creti S., Stefanizzi L., Lecci R., Palermo F., Coppini G., Pinardi N., Palazov A. 2020. Black Sea Physical Reanalysis (CMEMS BS-Currents) (Version 1) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). DOI 10.25423/CMCC/BLKSEA_REANALYSIS_PHYS_007_004
- Micheli F., Halpern B.S., Walbridge S., Ciriaco S., Ciriaco S., Ferretti F., Fraschetti S., Lewison R., Nykjaer L., Rosenberg A.A. 2013. Cumulative human impacts on Mediterranean and Black Sea marine ecosystems: assessing current pressures and opportunities // PloS one. V. 8. Iss. 12. P. 1–10.
- Oğuz T., Öztürk B. 2011. Mechanisms impeding natural Mediterraneanization process of Black Sea fauna // Journal of Black Sea/Mediterranean Environment. 2011. V. 17. Iss. 3. P. 234–253.
- Pebesma E., Bivand R. 2023. Spatial data science: With applications in R. Chapman and Hall/CRC. 314 p.
- Pecl G.T., Araujo M.B., Bell J.D., Blanchard J., Bonebrake T., Chen I-C., Clark D.T. et al. 2017. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being // Science. V. 355. Iss. 6332. P. 1–9.
- Yao S-L., Luo J-J., Wang P. 2017. Distinct global warming rates tied to multiple ocean surface temperature changes // Nature Climate Change. V. 7. P. 486–491.
- Kozhurin E.A., Shlyakhov V.A., Gubanov E.P. 2018. Crimea commercial fish dynamics in the Black Sea // Trudy VNIRO. V. 171. P. 157–169. P. 157–169. (In Russ.).
- Panov B.N., Smirnov S.S., Spiridonova E.O., Negoda S.A. 2022. Assessment of autumn migration conditions of the black sea khamsa to the shores of Crimea in 2019 and 2020 according to the data from the satellite // Issledovaniya Zemli iz kosmosa. Iss. 6. P. 63–73. DOI: 10.31857/S0205961422060082. (In Russ.).
- Panov B.N., Spiridonova O.E., Piatinskii M.M., Stytsyuk D.R. 2020. On the role of temperature as a factor influencing the behavior of the European sprat and the efficiency of its fishing // Aquatic Bioresources & Environment. V. 3. Iss. 1. P. 106–113. (In Russ.).
- Adedeji O., Reuben O., Olatoye O. 2014. Global climate change // Journal of Geoscience and Environment Protection. V. 2. Iss. 2. P. 115–125.
- Artusi R., Verderio P., Marubini E. 2002. Bravais-Pearson and Spearman correlation coefficients: meaning, test of hypothesis and confidence interval // The International journal of biological markers. V. 17. Iss. 2. P. 148–151.
- Bishara A.J., Hittner J.B. 2012. Testing the significance of a correlation with nonnormal data: comparison of Pearson, Spearman, transformation, and resampling approaches // Psychological methods. V. 17. Iss. 3. P. 399.
- Bonhomme F., Arbidol C., Bănanu D., Bahri-Sfar L., Fadhloui-Zid K., Strelkov P., Arculeo M., Soulier L., Quignard J-P. 2022. Systematics of European coastal anchovies (genus *Engraulis* Cuvier) // Journal of Fish Biology. V. 100. Iss. 2. P. 594–600.
- Chashchin A.K. 1996. The Black Sea populations of anchovy // Scientia Marina. V. 60. P. 219–225.
- Chashchin A., Shlyakhov V., Dubovik V., Negoda S. 2015. Stock Assessment of Anchovy (*Engraulis encrasicolus* L.) in Northern Black Sea and Sea of Azov // Progressive Engineering Practices in Marine Resource Management. P. 209–243.
- FAO. 2023. The State of Mediterranean and Black Sea Fisheries 2023 – Special edition. General Fisheries Commission for the Mediterranean. Rome. 52 p.
- FAO. 2024. Fishery and Aquaculture Statistics – Yearbook 2021. Rome. 232 p.
- Grishin A., Daskalov G., Shlyakhov V., Mihneva V. 2007. Influence of gelatinous zooplankton on fish stocks in the Black Sea: analysis of biological time-series // Marine Ecological Journal. V. 6. Iss. 2. P. 5–24.
- Guraslan C., Fach B.A., Oğuz T. 2017. Understanding the impact of environmental variability on anchovy overwintering migration in the Black Sea and its implications for the fishing industry // Frontiers in Marine Science. V. 4. P. 1–24.
- Kirkland E.J. 2010. Bilinear interpolation // Advanced computing in electron microscopy. P. 261–263.
- Kumar K.P., Reddi V. 2023. Significance of Spearman's Rank Correlation Coefficient // International Journal For Multidisciplinary Research. V. 5. Iss. 4. P. 1–4.

REFERENCES

Jelly *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz) in the Azov and Black Seas: biology and consequences of settlement. 2000. / S.P. Volovik ed. Rostov-on-Don: BKN. 500 p. (In Russ.)

Grishin A.N. 2014. Features of forming of winter accumulations of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) at the eastern coast of Crimea // Marine ecological journal. V. 13. Iss. 1. P. 9–16. (In Russ.)

Zuyev G.V. 2019 a. Modern state of the population of the European anchovy *Engraulis encrasicolus* (L.) (Pisces: Engraulidae) wintering off the coast of the Eastern Crimea and the North Caucasus // Marine biological journal. V. 4. Iss. 3. P. 56–68. DOI: 10.21072/mbj.2019.04.3.06. (In Russ.).

Zuyev G.V. 2019 b. Current population structure of European anchovy *Engraulis encrasicolus* L. (Engraulidae: Pisces) in the Sea of Azov – Black Sea basin and history of its formation // Marine biological journal. V. 4. Iss. 1. P. 45–62. (In Russ.).

Kazankova I.I. 2020. The effect of elevated temperature of the sea surface on the mussel recruitment off the coast of the southwestern Crimea // Systems of environmental control. Iss. 3. P. 133–138. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-3-133-138. (In Russ.).

- Le Traon P.Y., Reppucci A., Alvarez F.E., Aouf L., Behrens A., et al.* 2019. From observation to information and users: the Copernicus Marine Service perspective // *Frontiers in Marine Science*. V. 6. 234 p.
- Lima L., Masina S., Ciliberti S.A., Peneva E.L., Cretí S., Stefanizzi L., Lecci R., Palermo F., Coppini G., Pinardi N., Palazov A.* 2020. Black Sea Physical Reanalysis (CMEMS BS-Currents) (Version 1) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). DOI 10.25423/CMCC/BLKSEA_REANALYSIS_PHYS_007_004
- Micheli F., Halpern B.S., Walbridge S., Ciriaco S., Ciriaco S., Ferretti F., Fraschetti S., Lewison R., Nykjaer L., Rosenberg A.A.* 2013. Cumulative human impacts on Mediterranean and Black Sea marine ecosystems: assessing current pressures and opportunities // *PloS one*. V. 8. Iss. 12. P. 1–10.
- Oğuz T., Öztürk B.* 2011. Mechanisms impeding natural Mediterraneanization process of Black Sea fauna // *Journal of Black Sea/Mediterranean Environment*. 2011. V. 17. Iss. 3. P. 234–253.
- Pebesma E., Bivand R.* 2023. Spatial data science: With applications in R. Chapman and Hall/CRC. 314 p.
- Pecl G.T., Araujo M.B., Bell J.D., Blanchard J., Bonebrake T., Chen I-C., Clark D.T. et al.* 2017. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being // *Science*. V. 355. Iss. 6332. P. 1–9.
- Yao S-L., Luo J-J., Wang P.* 2017. Distinct global warming rates tied to multiple ocean surface temperature changes // *Nature Climate Change*. V. 7. P. 486–491.

*Поступила в редакцию 20.08.2024 г.
Принята после рецензии 20.09.2024 г.*