

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

Научная статья

УДК 551.556
EDN: HWSWUX

Ветровые условия возникновения апвеллингов в районе Южного берега Крыма

И. Г. Шокурова ^{1, ✉}, Т. В. Пластун ¹, Т. Е. Касьяненко ¹,
Р. Р. Станичная ¹, С. Б. Крашенинникова ², Ю. В. Симонова ¹

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

² Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей
имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия
✉ igshokurova@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2022; одобрена после рецензирования 09.02.2023;
принята к публикации 26.04.2023.

Аннотация

Цель. Цель работы – анализ повторяемости, скорости и продолжительности вдольбереговых ветров, вызывающих экмановский апвеллинг у Южного берега Крыма.

Методы и результаты. Используются 6-часовые данные о компонентах скорости ветра на высоте 10 м атмосферного реанализа ERA5 за 1979–2021 гг. и данные контроля температуры на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института Российской академии наук. Рассматривается повторяемость и скорость юго-западных, западных и северо-западных ветров, благоприятных для развития апвеллинга у Южного берега Крыма. Расчеты по многолетнему ряду данных показали, что сезонная изменчивость повторяемости каждого из этих ветров имеет разный характер, в то время как средняя скорость изменяется одинаково, уменьшаясь от зимы к лету. Летом повторяемость западных и северо-западных ветров увеличивается, а юго-западных – уменьшается. Суммарная повторяемость этих ветров достигает наибольших значений в июне, июле, декабре и январе с максимумом в июне. Наименьшие значения повторяемости отмечаются в августе и октябре. Межгодовые изменения скорости и повторяемости ветров западных направлений приводят к изменениям количества и продолжительности апвеллингов. Получена значимая положительная связь между средней скоростью и повторяемостью этих ветров в июне и количеством апвеллингов, зафиксированных по снижению температуры воды. Коэффициенты корреляции составляют 0,74 и 0,68 соответственно.

Выводы. Ветровые условия для возникновения апвеллингов в районе Южного берега Крыма присутствуют во все месяцы года, но наиболее благоприятные из них наблюдаются в июне, июле, декабре и январе вследствие более высокой повторяемости ветров западных направлений. Высокая скорость ветра является значимым фактором для развития апвеллинга.

Ключевые слова: апвеллинг, направление ветра, повторяемость ветра, температура морской воды, сезонная изменчивость, межгодовая изменчивость, Южный берег Крыма, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках тем государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ: FNNN-2021-0002, FNNN-2021-0003, FNNN-2021-0005, а также ФИЦ ИнБИОМ: 0556-2021-0003 (№ 121041400077-1).

© Шокурова И. Г., Пластун Т. В., Касьяненко Т. Е., Станичная Р. Р., Крашенинникова С. Б., Симонова Ю. В., 2023

Для цитирования: Ветровые условия возникновения апвеллингов в районе Южного берега Крыма / И. Г. Шокурова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 4. С. 435–447. EDN HWSWUX.

Original article

Winds Favorable for Upwellings near the Southern Coast of Crimea

I. G. Shokurova ¹, , T. V. Plastun ¹, T. E. Kasianenko ¹,
R. R. Stanichnaya ¹, S. B. Krasheninnikova ², Yu. V. Simonova ¹

¹ Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
² A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences,
Sevastopol, Russia
 igshokurova@mail.ru

Abstract

Purpose. The study is purposed at analyzing frequency, speed and duration of the along shore winds inducing the Ekman upwelling near the Southern Coast of Crimea.

Methods and Results. The 6-hour data on the wind speed components at the 10 m height derived from the ERA5 atmospheric reanalysis for 1979–2021, as well as the data of temperature monitoring performed at the Black Sea hydrophysical sub-satellite polygon of Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, are used. Frequency and speed of the winds (namely, the southwestern, western and northwestern ones) favorable for development of upwelling near the Southern Coast of Crimea are considered. The multi-year data based calculations show that the seasonal variability in frequency of each of these winds is of an individual character, whereas their average speeds change the same decreasing from winter to summer. In summer, frequency of the western and northwestern winds increases, and that of the southwestern ones – decreases. The total frequency of favorable winds is the highest in June (maximum values), July, January and December. The lowest frequency values occur in August and October. The interannual changes in speed and frequency of the westerly directions winds result in changes in the upwelling numbers and durations. A significant positive relationship was obtained between the mean speed and frequency of these winds in June and the number of upwellings recorded by a water temperature decrease. The correlation coefficients were 0.74 and 0.68, respectively.

Conclusions. The wind conditions for arising of upwelling near the Southern Coast of Crimea are observed in all the months of a year, but the most favorable ones – in June, July, December and January due to the high frequency of westerly winds. High wind speed is also a significant factor for the development of upwelling.

Keywords: upwelling, wind direction, wind frequency, seawater temperature, seasonal variability, interannual variability, Southern Coast of Crimea, Black Sea

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the themes of state assignments of FSBSI FRC MHI: FNNN-2021-0002, FNNN-2021-0003, FNNN-2021-0005 and FRC IBSS: 0556-2021-0003 (№ 121041400077-1).

For citation: Shokurova, I.G., Plastun, T.V., Kasianenko, T.E., Stanichnaya, R.R., Krasheninnikova, S.B. and Simonova, Yu.V., 2023. Winds Favorable for Upwellings near the Southern Coast of Crimea. *Physical Oceanography*, 30(4), pp. 398-409.

Введение

Апвеллинги существенно влияют на продуктивность экосистем прибрежных зон морей [1, 2]. Подъем глубинных вод, насыщенных биогенными элементами, обеспечивает рост биомассы фитопланктона и других компонен-

тов планктонного сообщества [3]. Район прибрежной зоны Южного берега Крыма характеризуется значительной динамической активностью, о чем свидетельствуют многочисленные случаи проявления апвеллингов на поверхности моря [4–7].

В глубоководной прибрежной зоне апвеллинг возникает при вдольбереговом направлении ветра, отклоняющего за счет силы Кориолиса и вязкости поверхностную воду от берега, взамен которой подтягиваются глубинные воды. При этом в Северном полушарии берег должен находиться слева от направления ветра. Средняя глубина шельфа Южного берега Крыма составляет более 50 м (рис. 1), что превышает толщину экмановского пограничного слоя, поэтому здесь преобладают апвеллинги, возникающие при вдольбереговых ветрах с западной составляющей в векторе скорости – юго-западных, западных и северо-западных. Это подтверждается результатами численных экспериментов с использованием трехмерной гидродинамической модели [8–10], анализом данных метеонаблюдений [4] и измерений температуры на океанографической платформе в пос. Кацивели [11].

С апреля по октябрь, когда поверхностная температура выше температуры подповерхностных вод [12], апвеллинг обнаруживается в виде понижений температуры за счет подъема более холодных глубинных вод. Наиболее контрастно это проявляется в летние месяцы, когда вертикальный градиент температуры в термоклине наибольший. Такой апвеллинг определяется по температуре поверхности моря, полученной по данным контактных измерений [4], в том числе термокос, установленных в шельфовых зонах [6, 13, 14], а также по спутниковым данным [1, 7, 15]. Зимой наличие апвеллинга определить сложно вследствие увеличения толщины верхнего квазиоднородного слоя [16], в котором вертикальный градиент температуры невелик. Поэтому вода, поднимающаяся к поверхности в результате апвеллинга, слабо отличается по температуре от окружающих вод.

Возникновение апвеллинга и его масштаб зависят от ветровых условий (направление, скорость ветра и продолжительность его действия), а также от стратификации и динамических процессов в море [13, 17–20]. Актуальной задачей является анализ сезонной и межгодовой изменчивости благоприятных ветровых условий возникновения апвеллинга. При отсутствии ретроспективных данных по температуре воды косвенным свидетельством возможных случаев апвеллингов могут быть сведения о повторяемости и скорости вызывающих их ветров. Статистика ветровых условий также позволяет оценить вероятность возникновения апвеллингов в холодный сезон, когда их невозможно идентифицировать по температуре поверхности моря при отсутствии данных по солености. Такие исследования проводятся во всех районах Мирового океана [21, 22]. Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению явления апвеллинга у Южного берега Крыма, вопрос статистики ветров, вызывающих апвеллинг, остается малоизученным.

Цель настоящей работы – провести анализ внутригодовой и межгодовой изменчивости повторяемости, скорости и продолжительности ветров западных направлений, благоприятных для возникновения апвеллингов у Южного берега Крыма.

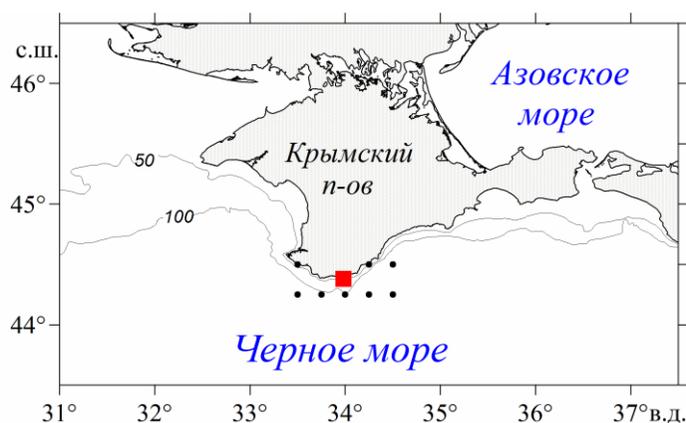
Данные и методы исследования

В работе использовались:

– 6-часовые данные о компонентах скорости ветра (u , v) на высоте 10 м с пространственным разрешением ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) атмосферного реанализа ERA5 за 1979–2021 гг. [23];

– одномоментные данные о температуре морской воды с измерительной термоксы, установленной на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического подспутникового полигона Морского гидрофизического института [6, 24]. Платформа расположена в прибрежной зоне Черного моря в Качивели на расстоянии ~ 450 м от берега, глубина места составляет ~ 30 м (рис. 1);

– данные контактных измерений температуры морской воды (три измерения в сутки в 08:00, 14:00 и 17:00) на глубине ~ 1 м у берега (Качивели), полученные в июне 1992–2021 гг.



Р и с. 1. Пространственное распределение данных реанализа ERA5 [23], по которым вычислялось направление ветра. Красным квадратом обозначено положение океанографической платформы

F i g. 1. Spatial distribution of the ERA5 reanalysis data [23] used to calculate wind direction. Red square indicates the position of the oceanographic platform

Характеристики ветра приводятся для района с координатами $44,25$ – $44,5^\circ$ с. ш., $33,5$ – $34,5^\circ$ в. д. (рис. 1). Направление ветра определялось для каждого 6-часового срока путем осреднения компонент скорости ветра в указанном районе и сопоставления полученного вектора с одним из восьми основных географических направлений: северным (С), северо-восточным (СВ), восточным (В), юго-восточным (ЮВ), южным (Ю), юго-западным (ЮЗ), западным (З), северо-западным (СЗ). Повторяемость каждого направления ветра определялась в процентах от общего числа случаев по всем направлениям.

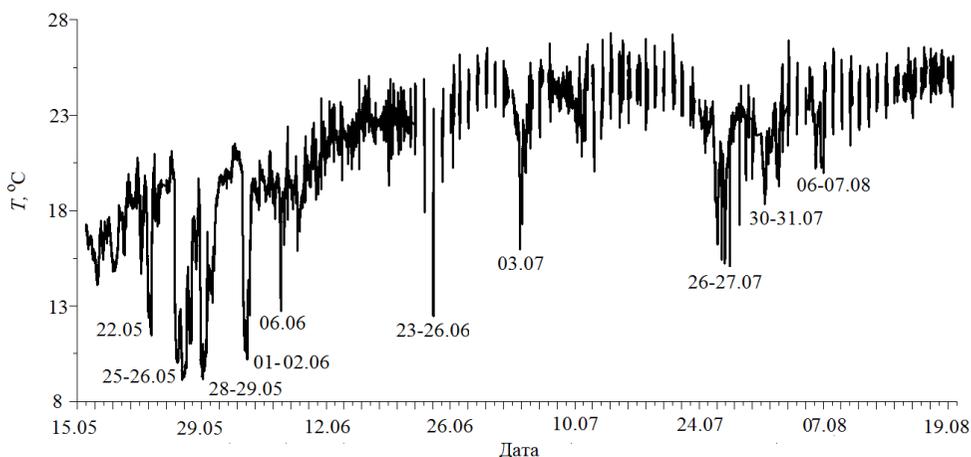
Для северо-западных, западных и юго-западных ветров, благоприятных для возникновения апвеллинга у Южного берега Крыма [4, 8, 9, 11], проводится анализ сезонной и межгодовой изменчивости повторяемости отдельных направлений, суммарной повторяемости и продолжительности ситуаций

с этими ветрами. Временные ряды повторяемости и скорости ветров западных направлений сопоставляются с количеством апвеллингов, полученным на основе многолетнего временного ряда наблюдений температуры морской воды в Качивели.

Результаты и обсуждение

Апвеллинги в районе Южного берега Крыма летом 2013 г. по данным термокосы. Рассмотрим пример ситуаций с апвеллингами в районе Черноморского полигона по данным термокосы, установленной на платформе (рис. 1). Из ряда значений температуры воды на глубине 0,75 м выделялись случаи с ее резким уменьшением более чем на 5°C , что соответствует общепринятому критерию определения температурного апвеллинга [4, 7].

Летом 2013 г. с середины мая до середины августа было зафиксировано 10 случаев резкого понижения температуры. Их анализ показал, что всем приведенным событиям предшествовали юго-западные, западные и северо-западные ветры (рис. 2, таблица) с максимальной скоростью 5–9 м/с. Ветры других направлений вызывали полное или временное прекращение апвеллинга. Анализ временной последовательности направлений ветра, предшествующего апвеллингу, лишь в отдельных случаях показывает присутствие продолжительного ветра одного направления. Более частыми являются ситуации с переменным направлением ветра. Отметим, что всем случаям с понижением температуры предшествовала последовательность событий с ветрами западных направлений, действовавшими в течение суток и более.



Р и с. 2. Временной ряд температуры на глубине 0,75 м летом 2013 г. по данным термокосы [6]. Даты на графике – время действия апвеллинга

F i g. 2. Temperature time series at the 0.75 m depth in summer, 2013 based on the temperature sensors data [6]. The dates on the graph indicate the upwelling duration

**Характеристики апвеллингов в районе океанографической платформы
летом 2013 года**
**Upwelling characteristics in the region of the oceanographic platform
in summer, 2013**

| Месяц / Month | Дата / Data | Продолжи- тельность, сут / Duration, days | Минимальная температура воды, °С / Minimum water temperature, °С | Максимальная скорость вет- ра, м/с / Max- imum wind speed, m/s | Направления ветра до начала апвеллингов / Wind directions preceding upwellings |
|--------------------|----------------|---|--|--|---|
| Май / May | 22 | 1 | 11,5 | 5 | СЗ, З, ЮЗ / NW, W, SW |
| | 25-26 | 2 | 8,2 | 8 | |
| | 28-29 | 1,5 | 9,5 | 6 | |
| Июнь / June | 01-02 | 2 | 10,2 | 7 | СЗ, З, ЮЗ / NW, W, SW |
| | 06 | 1 | 13,1 | 7 | |
| | 23-26 | 4 | 17,3 | 6 | |
| Июль / July | 03 | 1 | 16,2 | 9 | СЗ, З, ЮЗ / NW, W, SW |
| | 26-27 | 2 | 16,0 | 6 | |
| | 30-31 | 2 | 18,5 | 6 | |
| Август / August | 06-07 | 2 | 19,5 | 7 | СЗ, З, ЮЗ / NW, W, SW |

Сопоставление рядов значений температуры воды и ветра также показало, что не всегда действие ветров с западной компонентой сопровождается понижением температуры на поверхности моря. В двух ситуациях (9–10 и 15–16 июня) присутствовал ветер, благоприятный для возникновения апвеллинга, однако резкое понижение температуры наблюдалось на глубинах 6 и 8 м и не проявлялось на глубине 0,75 м. Это свидетельствует о неполном апвеллинге, когда глубинные воды не достигают поверхности моря [6, 13].

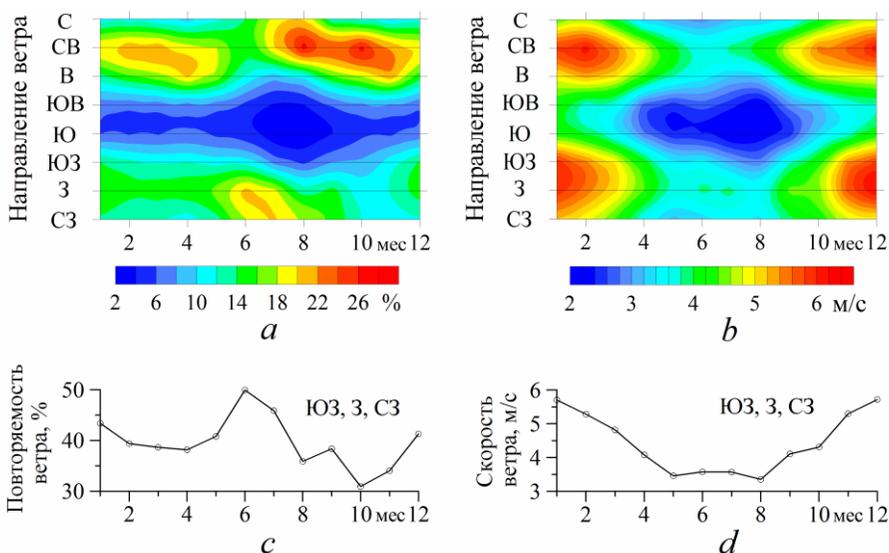
Таким образом, приведенный анализ соответствует результатам исследований [4, 8, 9, 11] и показывает, что у Южного берега Крыма резкое понижение температуры поверхности моря за счет поднятия холодных глубинных вод в большинстве случаев происходит в результате действия юго-западного, западного и северо-западного ветров.

Сезонная изменчивость повторяемости и скорости юго-западных, западных и северо-западных ветров в районе Южного берега Крыма. На основе данных реанализа ERA5 рассмотрим сезонную изменчивость повторяемости и скорости ветров, способных вызвать апвеллинг в указанном районе Черного моря. Так как в среднем частота появления каждого из этих ветров изменяется в зависимости от сезона года [12], будем рассматривать не только их суммарную повторяемость, но и вклад каждого направления.

Ветер северо-западного направления наиболее часто наблюдается в летние месяцы с максимальной частотой в июле (рис. 3, а). Западный ветер преобладает в первой половине года с максимальной частотой в июне, в августе его повторяемость уменьшается. Частота появления западного ветра в июне и северо-западного в июле составляет более 20% и превышает вклад северо-восточного ветра, доминирующего в течение всех остальных месяцев (рис. 3, а).

Юго-западный ветер чаще наблюдается в зимние и весенние месяцы, с июля по сентябрь он имеет низкую повторяемость с минимумом в августе.

Максимальная суммарная повторяемость ветров западных направлений отмечается в июне и составляет 50% от общего числа случаев (рис 3, *c*), что создает благоприятные условия для развития апвеллингов. Высокая частота появления таких ветров также отмечается в июле, декабре и январе. Низкая суммарная частота появления ветров западных направлений наблюдается в августе, октябре и ноябре, что связано с увеличением в эти месяцы доли северо-восточного ветра (рис. 3, *a*) [25].



Р и с. 3. Сезонная изменчивость повторяемости направлений ветра (*a*), средней скорости (*b*), суммарной повторяемости юго-западных, западных и северо-западных ветров (*c*) и их средней скорости (*d*) в районе Южного берега Крыма по данным ERA5 за 1979–2021 гг.

F i g. 3. Seasonal variability of wind direction frequency (*a*) and average speed (*b*), total frequency (*c*) and average speed (*d*) of the southwestern, western and northwestern winds near the Southern Coast of Crimea based on the ERA5 data for 1979–2021

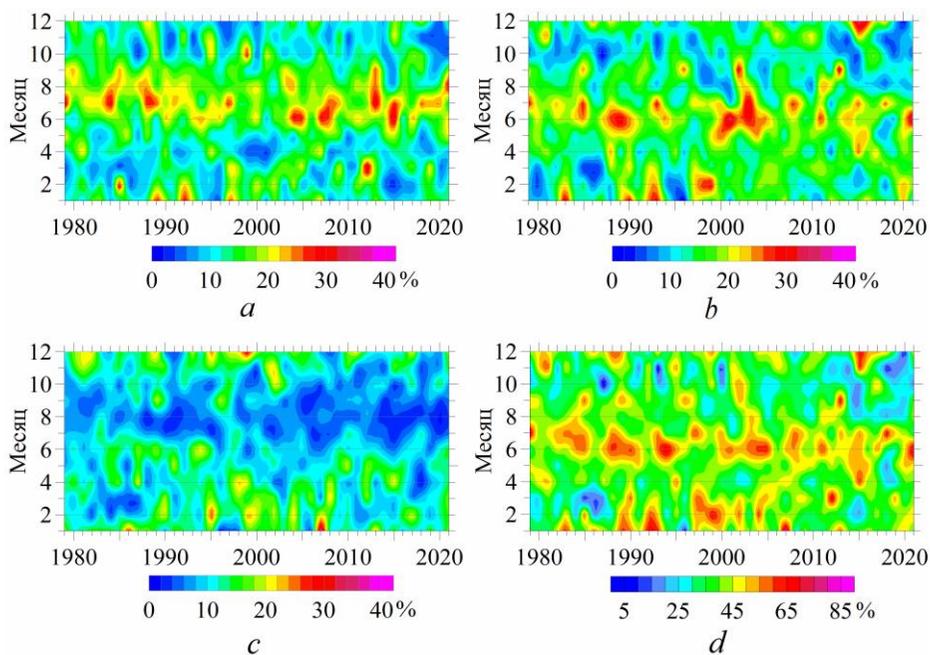
Полученная с использованием реанализа ERA5 внутригодовая изменчивость повторяемости ветров западных направлений хорошо соответствует результатам обработки многолетних данных измерений температуры воды на метеостанциях Южного берега Крыма и океанографической платформе в Качивели в летний сезон [4, 11]. В Ялте, Алуште и Качивели наибольшее количество апвеллингов наблюдается в июне, когда отмечается максимум повторяемости ветров западных направлений. В августе происходит уменьшение количества апвеллингов по сравнению с июнем и июлем, что согласуется с уменьшением повторяемости указанных ветров (рис. 3, *a*).

Средняя скорость ветров с западной составляющей имеет наибольшие значения в ноябре – феврале (5,3–6,0 м/с), что является благоприятным фактором для развития апвеллингов в это время года. В мае – августе наблюдаются невысокие значения средней скорости, 3–4 м/с (рис. 3, *b*, *d*).

Межгодовая изменчивость повторяемости и скорости юго-западных, западных и северо-западных ветров в районе Южного берега Крыма. Диаграммы на рис. 4 показывают, что межгодовая изменчивость повторяемости ветров западных направлений проявляется главным образом в значительном изменении самих величин повторяемости. При этом особенности сезонной изменчивости сохраняются в течение всего периода исследования.

Повторяемость северо-западного ветра увеличивается в летние месяцы (рис. 4, *a*) с высокими значениями в июле, а западного ветра – с апреля по июль с высокими значениями в июне (рис. 4, *b*).

Юго-западный ветер имеет стабильно низкую повторяемость с июля по сентябрь (рис. 4, *c*), что вносит отрицательный вклад в суммарную повторяемость ветров западных направлений в июле и августе. В результате максимум суммарной повторяемости наблюдается в июне (рис. 3, *a*; 4, *d*). Высокие значения также отмечаются в зимние месяцы (рис. 4, *d*).



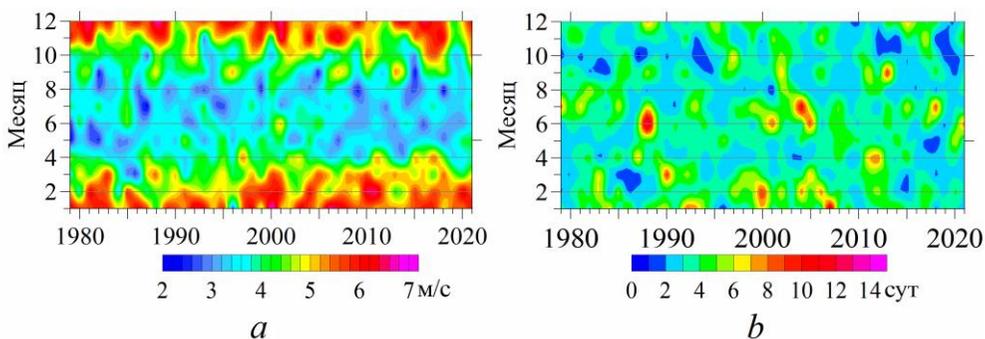
Р и с. 4. Среднемесячная повторяемость северо-западных (*a*), западных (*b*), юго-западных (*c*) ветров и их суммарная повторяемость (*d*) в 1979–2021 гг. по данным ERA5 в районе Южного берега Крыма

F i g. 4. Monthly average frequency of northwestern (*a*), western (*b*) and southwestern (*c*) winds, and their total frequency (*d*) near the Southern Coast of Crimea in 1979–2021 based on the ERA5 data

Особенности частоты появления северо-западных и юго-западных ветров в летние месяцы (рис. 4, *a*, *c*) связаны с преобладанием в это время над южной частью Азии области низкого давления (азиатская депрессия), распространяющейся до Черного моря [26]. При таком распределении приземного давления создаются условия для увеличения частоты северо-западных ветров, а юго-западные ветры становятся редкими [12, 27].

Во все годы высокая скорость ветров западных направлений преобладает с ноября по март (рис. 5, *a*). Высокие среднемесячные значения скорости наблюдаются также и в теплое время года. Например, средняя скорость ветров повышалась в июне 2001 г., в сентябре 1988, 1996, 2007 и 2013 гг. (рис. 5, *a*).

Таким образом, в каждом сезоне выделяются годы с высокими и низкими значениями повторяемости и скорости ветра, что может сопровождаться изменением количества и продолжительности случаев с апвеллингами.



Р и с. 5. Среднемесячная скорость юго-западных, западных и северо-западных ветров (*a*) и максимальная продолжительность их действия (*b*) в районе Южного берега Крыма в 1979–2021 гг.

F i g. 5. Monthly average speed of southwestern, western and northwestern winds (*a*), and maximum duration of their action (*b*) near the Southern Coast of Crimea in 1979–2021

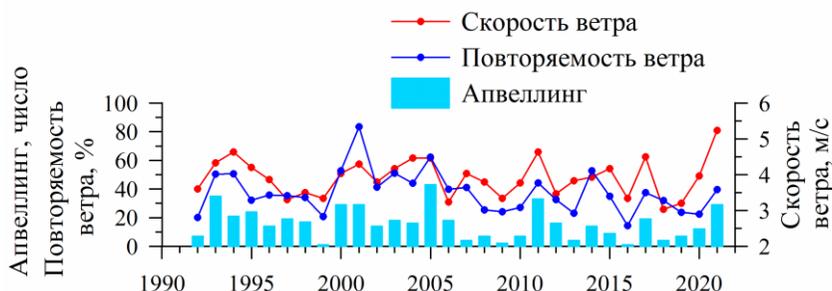
Продолжительность ситуаций с действием благоприятных для возникновения апвеллинга ветров. Ветры западных направлений разной продолжительности (от одного 6-часового срока до нескольких суток) наблюдаются во все месяцы года. В среднем в каждом месяце присутствуют 4–5 ситуаций с действием юго-западных, западных и северо-западных ветров продолжительностью сутки и более.

Наиболее продолжительные ситуации получены для следующих дат: 12–26 июня 1988 г. (более 14 дней), 1–13 июня 2021 г. (13 дней), 10–22 января 2007 г. (12 дней), 21 июня – 2 июля 2004 г. (11 дней), 29 августа – 8 сентября 2013 г. (10 дней) (рис 5, *b*).

Межгодовая изменчивость количества апвеллингов в июне по многолетним наблюдениям. Для сопоставления количества апвеллингов с повторяемостью и скоростью благоприятных ветров рассмотрим ряд многолетних наблюдений июньской температуры морской воды за 1992–2021 гг. Выбор месяца связан с тем, что в июне толщина верхнего прогретого слоя меньше по сравнению с другими летними месяцами [12]. Кроме того, в это время наблюдается наибольшая повторяемость ветров западных направлений (рис. 3, *c*). Эти факторы являются благоприятными для проявления апвеллинга на поверхности моря.

Будем учитывать сумму измерений с резким понижением температуры (соответствующих началу апвеллинга) и измерений с сохраняющейся низкой

температурой, свидетельствующей о поддерживающем апвеллинг действии ветра. Сравним межгодовую изменчивость этих значений с повторяемостью и средней скоростью ветров западных направлений (рис. 6).



Р и с. 6. Суммарная повторяемость, средняя скорость юго-западных, западных и северо-западных ветров по данным реанализа *ERA5* и суммарное количество измерений с пониженной температурой (апвеллинг) в Кацивели в июне 1992–2021 гг.

F i g. 6. Total frequency and mean speed of southwestern, western and northwestern winds based on the *ERA5* reanalysis data, and total number of the measurements with low temperature (upwelling) in Katsiveli in June, 1992–2021

Коэффициент корреляции между количеством измерений с апвеллингами и значениями средней скорости ветров западных направлений составляет 0,74, значениями повторяемости этих ветров – 0,68. Следовательно, высокая повторяемость и высокая скорость ветра сопровождается увеличением количества ситуаций с пониженной температурой воды, как, например, в июне 2001, 2005, 2011 и 2021 гг. (рис. 4, *d*; 5, *a*; 6). Низкая повторяемость ветров западных направлений и их низкая скорость приводили к уменьшению количества апвеллингов в июне 1999, 2009 и 2016 гг. Таким образом, межгодовые изменения повторяемости и скорости ветров западных направлений приводят к изменению количества апвеллингов.

Заклучение

Сопоставление случаев появления апвеллингов (по данным о температуре морской воды) с направлением ветра (по данным реанализа *ERA5*) показывает, что апвеллинги в районе Южного берега Крыма в основном вызываются синоптическими ситуациями с ветрами западных направлений.

Ветровые условия для возникновения экмановского апвеллинга у Южного берега Крыма существуют в течение всего года, но для каждого сезона имеются свои особенности, проявляющиеся в изменении скорости и повторяемости благоприятных для апвеллинга ветров. Скорость юго-западных, западных и северо-западных ветров имеет максимальные значения в зимние месяцы, что в совокупности с высокой повторяемостью этих ветров должно приводить к увеличению количества апвеллингов. В летние месяцы скорость ветра уменьшается, но в июне увеличивается суммарная повторяемость благоприятных ветров, что также может способствовать увеличению количества

апвеллингов. Это подтверждается статистически значимой положительной связью количества апвеллингов в июне с повторяемостью и скоростью ветров западных направлений. Наиболее низкие значения скорости и повторяемости этих ветров наблюдаются в августе и октябре.

Актуальными для дальнейших исследований являются вопросы анализа связи характеристик апвеллинга с ветровыми и температурными индексами, а также с условиями стратификации и динамическими процессами в море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sur H. İ., Özsoy E., Ünlüata Ü.* Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // *Progress in Oceanography*. 1994. Vol. 33, iss. 4. P. 249–302. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0079-6611(94)90020-5)
2. Plankton response to weakening of the Iberian coastal upwelling / F. F. Pérez [et al.] // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16, iss. 4. P. 1258–1267. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02125.x>
3. *Chavez F. P., Messié M.* A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems // *Progress in Oceanography*. 2009. Vol. 83, iss. 1–4. P. 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032>
4. *Ловенкова Е. А., Полонский А. Б.* Климатические характеристики апвеллинга у побережья Крыма и их изменчивость // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 5. С. 44–52.
5. *Тужилкин В. С., Новиков А. А.* Климатические проявления апвеллинга в российской прибрежной зоне Черного моря // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2011. № 6. С. 43–53.
6. *Толстошеев А. П., Мотыжнев С. В., Лунев Е. Г.* Результаты долговременного мониторинга вертикальной термической структуры шельфовых вод на Черноморском гидрофизическом полигоне РАН // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 1. С. 75–87. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-75-87
7. *Станичная Р. Р., Станичный С. В.* Апвеллинги Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 4. С. 195–207. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207
8. *Иванов В. А., Михайлова Э. Н.* Апвеллинг в Черном море. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 92 с.
9. *Михайлова Э. Н., Музылёва М. А., Полонский А. Б.* Пространственно-временная изменчивость характеристик апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма в 2005–2008 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2009. Вып. 20. С. 160–170.
10. *Полонский А. Б., Музылёва М. А.* Современная пространственно-временная изменчивость апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2016. № 4. С. 96–108. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-4-96-108>
11. *Куклин А. К., Куклина Н. Я., Шабалина О. А.* Температура морской воды в районе океанографической платформы в Кацивели // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2014. Вып. 28. С. 186–194.
12. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.

13. Сильвестрова К. П., Зацепин А. Г., Мысленков С. А. Прибрежные апвеллинги в Геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 4. С. 521–530. <https://doi.org/10.7868/S0030157417040013>
14. Примеры подходов к исследованию температурной изменчивости вод шельфа Черного моря при помощи кластера термокос / В. В. Очердник [и др.] // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 2. С. 173–185. doi:10.31857/S0030157420010189
15. 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.
16. Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием / А. А. Кубряков [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 449–468. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-449-468
17. Synoptic upwelling and cross-shelf transport processes along the Crimean coast of the Black Sea / G. Gawarkiewicz [et al.] // *Continental Shelf Research*. 1999. Vol. 19, iss. 8. P. 977–1005. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(99\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(99)00003-5)
18. *Lehmann A., Myrberg K.* Upwelling in the Baltic Sea – A review // *Journal of Marine Systems*. 2008. Vol. 74, Supplement. P. S3–S12. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.02.010>
19. Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море / А. Г. Зацепин [и др.] // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 2. С. 203–214. doi:10.7868/S0030157416020222
20. *Kämpf J., Chapman P.* The Functioning of Coastal Upwelling Systems // *Upwelling Systems of the World. A Scientific Journey to the Most Productive Marine Ecosystems*. Cham : Springer, 2016. P. 31–65. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42524-5_2
21. New Insights about Upwelling Trends off the Portuguese Coast: An ERA5 Dataset Analysis / S. Ferreira [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, iss. 12. 1849. doi:10.3390/jmse10121849
22. Sporadic wind-driven upwelling/downwelling and associated cooling/warming along Northwestern Mediterranean coastlines / R. Odic [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2022. Vol. 250. 104843. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104843>
23. 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>
24. Black Sea GIS developed in MHI / E. Zhuk [et al.] // *Proceedings of SPIE 2016*. Vol. 9688. Fourth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment. (RSCy2016). 96881C. <https://doi.org/10.1117/12.2241631>
25. *Шокуров М. В., Шокурова И. Г.* Завихренность напряжения трения ветра на поверхности Черного моря при различных ветровых режимах // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 6. С. 13–26. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-13-26
26. *Trenberth K. E., Paolino Jr. D. A.* The Northern Hemisphere Sea-Level Pressure Data Set: Trends, Errors and Discontinuities // *Monthly Weather Review*. 1980. Vol. 108, iss. 7. P. 855–872. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<0855:TNHSLP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<0855:TNHSLP>2.0.CO;2)
27. *Шокурова И. Г., Кубряков А. А., Шокуров М. В.* Влияние долговременных изменений крупномасштабного поля приземного давления на ветровой режим и завихренность напряжения трения ветра в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 2. С. 179–194. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-179-194

Об авторах:

Шокурова Ирина Геннадьевна, старший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-3150-8603**, **WOS ResearchID: C-8223-2016**, igshokurova@mail.ru

Пластун Татьяна Владимировна, младший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-7685-7455**, **WOS ResearcherID: AAC-1888-2022**, ptv63@inbox.ru

Касьяненко Татьяна Евгеньевна, ведущий инженер-программист, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0009-0002-9178-3698**, kte1969@mail.ru

Станичная Римма Ризовна, научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-5041-519X**, **WOS ResearcherID: F-9006-2014**, rrsta@mail.ru

Крашенинникова Светлана Борисовна, старший научный сотрудник, отдел функционирования морских экосистем, ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ РАН (299011, Россия, г. Севастополь, проспект Нахимова, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0777-233X**, **WoS ResearcherID: AAR-8724-2020**, svetlanabk@mail.ru

Симонова Юлия Викторовна, младший научный сотрудник, Черноморский гидрофизический подспутниковый полигон, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-8075-8748**, **WoS ResearcherID: GYU-2700-2022**, julia.simonova.0502@gmail.com