

Индекс апвеллинга в прибрежной зоне Южного берега Крыма в Черном море

И. Г. Шокурова ¹ ✉, Т. В. Пластун ¹, Ю. В. Симонова ¹,
В. Ю. Касьяненко ²

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

² Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского,

Симферополь, Россия

✉ igshokurova@mail.ru

Поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 29.11.2024;
принята к публикации 13.03.2025.

Аннотация

Цель. Цель исследования – анализ ветровых условий, приводящих к возникновению прибрежных апвеллингов у Южного берега Крыма (Кацивели) в Черном море на основе расчетов ветрового индекса апвеллинга.

Методы и результаты. Использовались 6-часовые данные реанализа ERA5 о компонентах скорости приземного ветра, данные многолетних измерений температуры морской воды и воздуха у берега в Кацивели (1992–2021 гг.), а также спутниковые карты температуры поверхности моря. Индекс апвеллинга вычислялся на основе расчета экмановского переноса, возникающего в результате действия вдольберегового ветра. Индекс считался положительным, если перенос направлен в море. Для района Кацивели это условие соответствует ветрам с западной составляющей в векторе скорости. Отрицательные значения индекса и перенос воды к берегу соответствуют ветрам восточных направлений. Расчеты индекса показали: наиболее благоприятные ветровые условия для возникновения апвеллинга наблюдаются зимой (в декабре и январе) и летом (в июне и июле), что обусловлено высокой повторяемостью ветров западных направлений. Максимальное значение индекса апвеллинга отмечается в июне. Для этого месяца анализировалась статистическая связь между среднемесячными значениями индекса апвеллинга, температуры воды, числа апвеллингов, повторяемости и скорости западных ветров. Получено, что межгодовая изменчивость величины ветрового индекса апвеллинга в июне соответствует изменчивости числа апвеллингов. Коэффициент корреляции между временными рядами среднемесячных значений индекса апвеллинга и числа измерений, при которых температура воды была пониженной (апвеллинг), составил 0,88. В годы с высокой повторяемостью и скоростью ветров западных направлений число апвеллингов увеличивалось, а в годы, когда преобладали ветры восточных направлений, оно было минимальным. Анализ изменчивости ветрового индекса и температуры морской воды по 6-часовым данным показал, что высокие положительные значения индекса соответствуют началу апвеллинга, а смена знака индекса на отрицательный – его прекращению.

Выводы. Хорошее соответствие изменчивости ветрового индекса и числа измерений при низкой температуре воды летом показывает возможность использования индекса для изучения ветровых условий, приводящих к развитию апвеллингов, и выполнения прогнозов их возникновения.

Ключевые слова: прибрежный апвеллинг, индекс апвеллинга, температура морской воды, скорость ветра, направление ветра, Кацивели, Южный берег Крыма, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках тем государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ: FNNN-2024-0014 и FNNN-2024-0016.

Для цитирования: Индекс апвеллинга в прибрежной зоне Южного берега Крыма в Черном море / И. Г. Шокурова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 3. С. 295–309. EDN VWXMSB.

Original article

Upwelling Index at the Southern Coast of Crimea in the Black Sea

I. G. Shokurova ^{1, ✉}, T. V. Plastun ¹, Yu. V. Simonova ¹,
V. Yu. Kasianenko ²

¹ Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

² V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

✉ igshokurova@mail.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to analyze wind conditions leading to the occurrence of coastal upwelling events off the Southern coast of Crimea (Katsiveli) in the Black Sea based on the calculations of wind upwelling index.

Methods and Results. The 6-hour ERA5 reanalysis data on the surface wind speed components, the long-term measurement data on seawater and air temperature near the coast in Katsiveli (1992–2021), as well as the satellite maps of sea surface temperature are used. The upwelling index is calculated based on the Ekman transport arising from the action of along-coastal wind. The index is considered to be positive if the transport is directed to the sea. For the Katsiveli area, this condition corresponds to the winds with a western component in the velocity vector. The index negative values and water transport directed to the coast correspond to the eastern winds. The index calculations have shown that the most favorable wind conditions for an upwelling event are observed in winter (December and January) and summer (June and July), that is conditioned by high frequency of the western winds. The maximum value of upwelling index is noted in June. The statistical relationship between the monthly average values of upwelling index, water temperature, upwelling number, frequency and speed of westerly winds is analyzed for this month. It is found that the interannual variability of wind upwelling index value in June corresponds to that of the upwelling number. The correlation coefficient between the time series of monthly average values of the upwelling index and the number of measurements during which the water temperature was low (upwelling), is 0.88. During the years characterized by high frequency and speed of the western winds, the upwelling number increased, whereas when the eastern winds were predominant, it was minimal. Analysis of the variability of wind index and seawater temperature based on the 6-hour data shows that the index high positive values correspond to the onset of upwelling, and a change of the index sign to negative means its cessation.

Conclusions. Good agreement between the wind index variability and the number of measurements at low water temperature in summer demonstrates the index potential for studying the wind conditions resulting in the development of upwelling events, as well as for forecasting their occurrence.

Keywords: coastal upwelling, upwelling index, sea water temperature, wind speed, wind direction, Katsiveli, Southern coast of Crimea, Black Sea

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of state assignments of FSBSI FRC MHI: FNNN-2024-0014 and FNNN-2024-0016.

For citation: Shokurova, I.G., Plastun, T.V., Simonova, Yu.V. and Kasianenko, V.Yu., 2025. Upwelling Index at the Southern Coast of Crimea in the Black Sea. *Physical Oceanography*, 32(3), pp. 312-325.

Введение

Акватория Черного моря, прилегающая к Южному берегу Крыма, является зоной природной морской экосистемы [1], а также районом развития аквакультуры [2]. Продуктивность морских вод зависит от концентрации биогенных элементов в верхнем фотическом слое моря [3]. Так как крупных рек в этом районе нет, то обогащение поверхностных вод биогенными элементами может происходить за счет поступления из глубоких слоев моря, где их концентрация более высокая [4]. Зимой верхний слой моря хорошо перемешан вследствие сильного ветра и зимней конвекции и обогащен питательными веществами [5] по всей акватории моря. Летом перемешивание вод ослаблено [6]. В это время значительно возрастает роль берегового апвеллинга, который является важным фактором, обеспечивающим подъем глубинных вод к поверхности [7]. Сведения о частоте появления апвеллингов, влияющих на условия обитания морских организмов, могут использоваться при анализе результатов мониторинга жизнедеятельности морской экосистемы, который ведется у берегов Крыма [8, 9]. Кроме того, Южный берег Крыма является известной курортной зоной, поэтому знание связанных с апвеллингом особенностей и интенсивности изменений температуры воды в летнее время также представляет интерес для исследований [10].

Апвеллинг определяется как подъем воды с нижележащих горизонтов на поверхность моря. Согласно классической теории Экмана, сформулированной для глубокого моря, прибрежный апвеллинг может вызываться ветром, направленным вдоль побережья, находящегося от него слева (в Северном полушарии) или справа (в Южном полушарии). В этом случае экмановский перенос, ортогональный ветру и направленный от берега, перемещает верхний слой воды в сторону моря, вызывая компенсационный подъем глубинных вод [11]. Шельф у Южного берега Крыма узкий, с быстрым увеличением глубины (рис. 1), поэтому апвеллинг здесь вызывают вдольбереговые ветры. В районе Качивели это ветры западных направлений. Возникновение апвеллинга и его пространственный и временной масштаб зависят от скорости ветра и продолжительности его действия, сезонной стратификации вод и динамических процессов в море [12–14].

В зимнее время апвеллинги в Черном море не фиксируются по температуре, так как верхний слой моря перемешан [6]. Летом береговые апвеллинги хорошо заметны по температуре воды – более низкой в сравнении с окружающими теплыми водами [15–17]. В районе Южного берега Крыма область воды с низкой температурой может распространяться в море на расстояние до 60–80 км [17, 18].

Изучению апвеллинга у берегов Крыма посвящено большое число работ. Ветровые условия возникновения апвеллингов у Южного берега Крыма изучались на основе данных береговых метеостанций [19], измерений температуры на гидрофизическом полигоне в Качивели [20–23], судовых измерений [15], спутниковых данных [16–18], данных заякоренных буев [24]. На основе численного моделирования апвеллинги у берегов Крыма изучались в работах [18, 25, 26]. Статистика числа апвеллингов, возникающих у Южного берега Крыма, приведена в работах [17, 19, 20]. Статистика повторяемости и скоро-

сти ветров, благоприятных для апвеллинга у Южного берега Крыма, по данным реанализа ERA5 представлена в работе [21].

Ветровые условия возникновения апвеллинга часто исследуются с использованием ветрового индекса апвеллинга, вычисляемого на основе экмановского переноса массы [27]. Этот индекс широко применяется для изучения апвеллинга в разных районах Мирового океана [28–31], в том числе и в акватории Черного моря [32]. Также существуют усовершенствованные модификации ветрового индекса [33]. Критерий развития ветрового апвеллинга с учетом скорости и направления течений в море предложен в работе [13] и применен в [14, 24]. В ряде работ используется температурный индекс апвеллинга [30]. Он определяется как разность значений температуры воды в зоне апвеллинга у берега и в открытых водах, обычно на расстоянии, позволяющем избежать влияния захваченных течениями или вихрями вод апвеллинга.

Для района Южного берега Крыма исследования условий возникновения апвеллингов с использованием индексов пока не проводились. В настоящей работе условия возникновения апвеллинга анализируются с помощью ветрового индекса апвеллинга (UI) [27]. Проводится сопоставление натуральных данных о температуре верхнего слоя морской воды со значениями индекса. Использование индекса в дальнейшем может позволить уточнить особенности возникновения апвеллинга в зависимости от ветровых условий и применять его при климатических исследованиях условий функционирования экосистемы прибрежных районов Крыма.

Цель работы – расчет ветрового индекса апвеллинга и анализ эффективности его использования для изучения ветровых условий возникновения апвеллингов у Южного побережья Крыма.

Данные и методы исследования

Температура воды и воздуха. Для регистрации апвеллингов использовались:

– данные регулярных дневных (в 08:00, 14:00 и 17:00) измерений температуры морской воды T_w и воздуха T_A (°C) за июнь 1992–2021 гг., проводимых на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института (МГИ) РАН в Кацивели (Крым) [34]. Температура воды измеряется у берега с мостка на глубине 0,75 м;

– карты температуры поверхности Черного моря из архива сайта http://dvs.net.ru/mp/index_ru.shtml.

Апвеллинг. Апвеллинг определялся как резкое понижение температуры воды на 5 °C и более, сохраняющееся от шести часов до нескольких суток [19]. Использовались измерения *in situ* в Кацивели. Число апвеллингов учитывалось в виде суммарного числа измерений при низкой температуре воды. Это число включает измерение, при котором температура воды была резко понижена, соответствующее началу апвеллинга, и последующие измерения, при которых низкая температура сохранялась, что означает поддерживающее апвеллинг действие ветра. Повышение температуры воды и сохранение ее высоких значений означали прекращение апвеллинга.



Р и с. 1. Пространственное распределение данных реанализа ERA5 [36], по которым вычислялись характеристики ветра (черные точки). Красным квадратом обозначено положение Черноморского гидрофизического подспутникового полигона МГИ в Качивели

F i g. 1. Spatial distribution of ERA5 reanalysis data [36] used to calculate wind characteristics (black dots). Red square indicates the location of the Black Sea hydrophysical subsatellite polygon, MHI in Katsiveli

Ветер. В работе использовались 6-часовые данные атмосферного реанализа ERA5 о компонентах скорости ветра u и v (м/с) на высоте 10 м за 1979–2021 гг. с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ [35].

Характеристики ветра вычислялись для каждого 6-часового периода по данным о компонентах скорости ветра, осредненных по трем узлам сетки данных ERA5 в морской зоне, ближайшим к Качивели, с координатами $44,25^\circ$ с. ш. и $33,75; 34; 34,25^\circ$ в. д. (рис. 1).

Ветры с положительной зональной компонентой в векторе скорости для упрощения также будем называть ветрами западных направлений или западными ветрами, а с отрицательной компонентой – ветрами восточных направлений или восточными ветрами.

Ветровой индекс апвеллинга. Для количественной оценки ветровых условий появления апвеллинга использовался ветровой индекс апвеллинга [27], основанный на расчете зональной U^{Ek} и меридиональной V^{Ek} составляющих экмановского переноса $\mathbf{V}^{Ek} = (U^{Ek}, V^{Ek})$, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, представляющего собой интегральный по глубине поток, шириной 1 м, направленный по отношению к направлению ветра под углом 90° :

$$U^{Ek} = \frac{\tau_y}{\rho_w f}, \quad V^{Ek} = -\frac{\tau_x}{\rho_w f},$$

где $\boldsymbol{\tau} = (\tau_x, \tau_y)$ – напряжение трения ветра: $\tau_x = \rho_a C_d |\mathbf{v}| u$, $\tau_y = \rho_a C_d |\mathbf{v}| v$, u – зональная и v – меридиональная составляющие скорости ветра $\mathbf{v} = (u, v)$ на высоте 10 м над уровнем моря; $\rho_a = 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ – плотность воздуха; $\rho_w = 1012 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ – плотность морской воды; $C_D = 1,3 \cdot 10^{-3}$ – безразмерный коэффициент

коэффициент сопротивления морской поверхности, принимался постоянным; f – параметр Кориолиса.

Экмановский перенос $\mathbf{V}^{\text{Ek}} = (U^{\text{Ek}}, V^{\text{Ek}})$ направлен под углом 90° вправо от направления ветра в Северном полушарии. Если береговая линия наклонена под углом α по отношению к линии широты, то значение переноса $\mathbf{V}^{\text{Ek}'}$ вычисляется с использованием зональной и меридиональной составляющих переноса Экмана как $\mathbf{V}^{\text{Ek}'} = V^{\text{Ek}} \cos \alpha - U^{\text{Ek}} \sin \alpha$. В этом исследовании мы не учитываем малые наклоны береговой линии от м. Сарыч до м. Ай-Тодор (рис. 1) и предполагаем, что береговая линия направлена вдоль широты, поэтому $\alpha = 0$, $U^{\text{Ek}} = 0$, а $\mathbf{V}^{\text{Ek}'} = V^{\text{Ek}}$.

Индекс апвеллинга будем рассматривать как перенос V^{Ek} ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$), вычисляемый вдоль километровой полосы береговой линии [29, 30]. Кроме того, индекс апвеллинга принято определять положительным, если перенос направлен в море. В нашем случае в сторону моря направлен перенос с отрицательным знаком, поэтому индекс определим как $UI = -V^{\text{Ek}}$. Положительные значения индекса UI будут соответствовать наличию западной составляющей в векторе скорости ветра. В этом случае экмановский перенос направлен от берега и создаются условия для подъема глубинных вод (апвеллинга). Отрицательные значения индекса апвеллинга, наоборот, будут соответствовать наличию восточной составляющей в векторе скорости и указывать на то, что экмановский перенос направлен к берегу и создаются условия для опускания поверхностных вод (даунвеллинга).

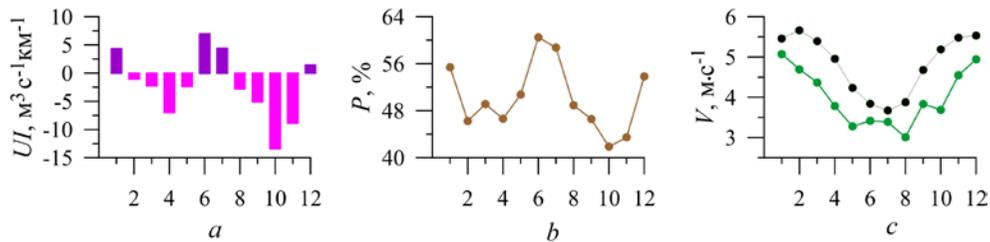
Результаты и обсуждение

Сезонная изменчивость индекса апвеллинга. Расчеты индекса апвеллинга показали, что у Южного берега Крыма можно выделить два сезона, в которые ветер наиболее часто создает условия для возникновения апвеллинга, – зимний (декабрь, январь) и летний (июнь, июль) (рис. 2, *a*). В эти месяцы в зональной составляющей скорости ветра преобладает западное направление. Зависимость сезонной изменчивости индекса от повторяемости ветров с западной составляющей в векторе скорости хорошо видна при сопоставлении рис. 2, *a* и 2, *b*. Коэффициент корреляции между ними составляет 0,95. Несмотря на более высокую скорость ветра в декабре и январе (рис. 2, *c*), индекс апвеллинга по абсолютной величине в эти месяцы ниже, чем в июне (рис. 2, *a*). Таким образом, на сезонных временных масштабах повторяемость ветров, благоприятных для возникновения апвеллинга, играет более важную роль по сравнению со скоростью ветра.

Наиболее благоприятные условия для возникновения апвеллинга отмечаются в июне, когда абсолютное значение положительного индекса апвеллинга максимально (рис. 2, *a*). В этом месяце повторяемость ветров западных направлений превышает 60 % (рис. 2, *b*). В июне также наблюдается локальное по времени усиление скорости западных ветров (рис. 2, *c*). К августу скорость резко уменьшается.

Между тем в течение года преобладают отрицательные значения индекса апвеллинга, обусловленные ветрами с восточной составляющей в векторе

скорости (рис. 2, *a*). То есть даунвеллинг происходит чаще, чем апвеллинг, что хорошо соответствует результатам многолетних наблюдений за температурой воды, выполненных на морской стационарной платформе в Качивели [20]. Кроме того, ветры восточных направлений во все месяцы имеют большую скорость, чем ветры западных направлений (рис. 2, *c*). Частота ветровых условий возникновения даунвеллинга максимальна в октябре (рис. 2, *a, b*), что также подтверждается данными наблюдений [20].



Р и с. 2. Среднемесячные значения индекса апвеллинга (*a*), повторяемость ветров западных направлений (*b*), скорость ветров западных (зеленая кривая) и восточных (черная кривая) направлений (*c*) в 1979–2021 гг. у Южного берега Крыма

F i g. 2. Monthly average values of the upwelling index (*a*), frequency of western winds (*b*), speed of western (green curve) and eastern (black curve) winds (*c*) near the Southern coast of Crimea in 1979–2021

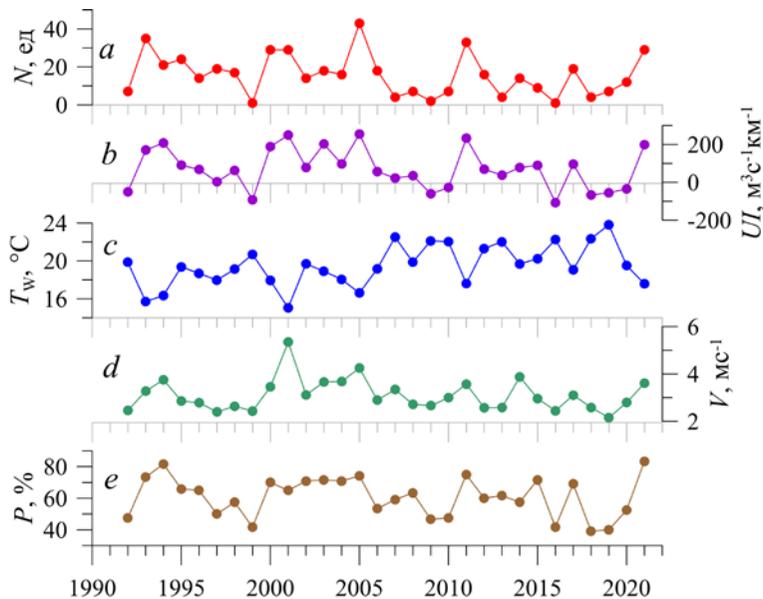
Принимая во внимание полученную сезонную изменчивость индекса апвеллинга, межгодовая изменчивость условий возникновения апвеллинга далее анализировалась на основе данных за июнь. При этом учитывалось, что в июне:

- достигается максимум положительного индекса апвеллинга, соответствующего условиям переноса поверхностных вод от берега и подъема глубинных вод;
- отмечается наиболее высокая повторяемость ветров с западной составляющей в векторе скорости у Южного берега Крыма (рис. 2, *b*) [21];
- апвеллинг хорошо выявляется по температуре воды [17], поскольку летом поднимающиеся из нижележащих слоев моря воды имеют температуру более низкую, по сравнению с температурой прогретых поверхностных вод;
- стратификация в термоклине, препятствующая вертикальному обмену, еще не достигает своего максимума, который отмечается в августе [6].

Межгодовая изменчивость числа апвеллингов и индекса апвеллинга в июне. За исследуемый период, 1992–2021 гг., в Качивели в июне было зарегистрировано 467 измерений, при которых температура воды соответствовала апвеллингам. Это составляет 17,3 % от всего числа измерений (2700). При этом независимых событий апвеллинга было 74. В среднем за месяц наблюдалось 2,4 независимых события апвеллинга и 15,6 измерений при пониженной температуре (табл. 1). Высокое число апвеллингов в июне было в 1993, 2000, 2001, 2005, 2011, 2021 гг. (рис. 3, *a*). Максимальное число измерений, при которых температура воды была низкой, было зарегистрировано в 2005 г. – 43. Отсутствие или малое число апвеллингов отмечалось в 1999, 2009, 2016 гг.

Среднемесячные характеристики условий апвеллинга за июнь 1992–2021 гг.
Monthly average characteristics of upwelling conditions for June, 1992–2021

Характеристика / Characteristic	Среднее / Average	Максимум / Maximum	Минимум / Minimum
Число наблюдений с пониженной температурой воды (апвеллинг) N / Number of observation of low water temperature (upwelling) N	15,6	43,0	1,0
Средняя температура воды, T_w , °C / Average water temperature, T_w , °C	19,5	23,8	15,0
Средняя скорость ветров западных направлений, V , м·с ⁻¹ / Average speed of western winds, V , m·s ⁻¹	3,1	5,3	2,1
Повторяемость ветров западных направлений, P , % / Frequency of western winds, P , %	73,0	83,3	39,2
Среднее значение индекса апвеллинга, м ³ ·с ⁻¹ ·км ⁻¹ / Average value of upwelling index, m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻¹	70,0	255	-107,0



Р и с. 3. Суммарное за июнь число наблюдений за низкой температурой воды (апвеллинг) N (a); средние значения за июнь индекса апвеллинга UI (b), температуры воды T_w (c), скорости V (d) и повторяемости P (e) ветров западных направлений

F i g. 3. Total number of observation of low water temperature (upwelling) N for June (a); June-average values of upwelling index UI (b), water temperature T_w (c), speed V (d) and frequency P (e) of western winds

Средняя температура воды в исследуемые годы в июне составляла 19,5 °C. Максимальная температура была зафиксирована в 2019 г. и в сред-

нем за месяц составила 23,8 °С (рис. 3, *c*). Температура также была высокой (более 22 °С) в 2007, 2009, 2010, 2013, 2016 и 2018 гг. Минимальная средняя температура наблюдалась в 1993 и 2001 гг., и ее значение составляло 15 °С.

Наиболее частая повторяемость ветров с западной составляющей в векторе скорости (83,3 %) отмечалась в 2021 г. (рис. 3, *e*), минимальная (39,2 %) – в 2018 г. Среднемесячная скорость западных ветров достигала максимума 5,3 м·с⁻¹ в 2001 г. (рис. 3, *d*). Низкая скорость, 2,1 м·с⁻¹, отмечалась в 1998 г.

Превышение числа положительных значений индекса апвеллинга над числом отрицательных указывает на стабильность благоприятных для апвеллинга ветровых условий у Южного берега Крыма в июне (табл. 1, рис. 3, *b*). Максимумы числа апвеллингов в сочетании с низкой температурой воды в 2001 и 2005 гг. соответствуют максимальным положительным показателям ветрового индекса (рис. 3, *a, b*). Отсутствие апвеллингов в 1999 и 2016 гг. хорошо сочетается с низкими значениями ветрового индекса.

Временной ряд суммарных за месяц значений числа измерений, при которых был зафиксирован апвеллинг, имеет высокую значимую связь с индексом апвеллинга. Значение коэффициента корреляции составляет 0,88 (табл. 2). Коэффициент корреляции индекса апвеллинга со средней температурой воды равен -0,81, а со скоростью и повторяемостью ветров западных направлений составляет соответственно 0,83 и 0,89.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Коэффициенты корреляции между временными рядами (1992–2021 гг.) числа наблюдений с пониженной температурой воды (апвеллинг) N , среднемесячных значений температуры воды T_w , индекса апвеллинга UI , скорости V и повторяемости P ветров западных направлений в июне
Correlation coefficients between the time series (1992–2021) of a number of low water temperature (upwelling) N observations, and the monthly average values of water temperature T_w , upwelling index UI , speed V and frequency P of western winds in June

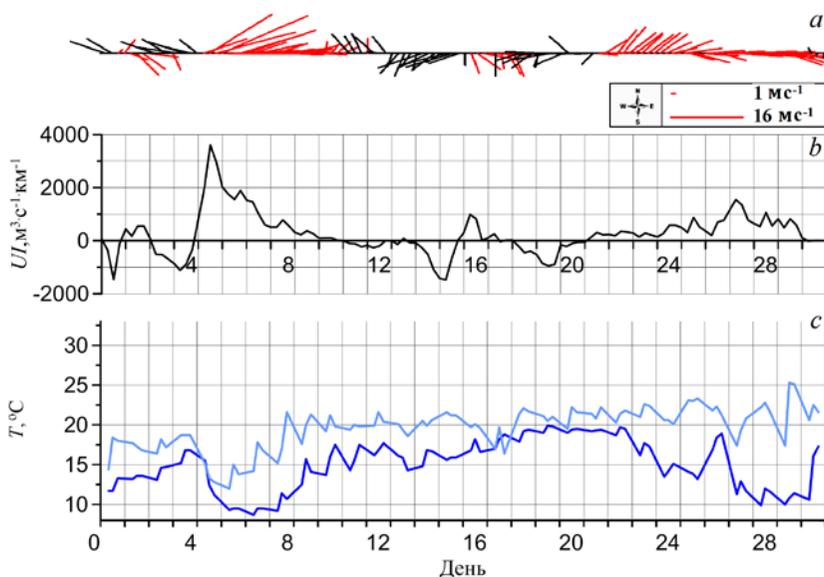
Временной ряд / Time series	T_w	UI	V	P
N	-0,84	0,88	0,69	0,71
T_w	1,00	-0,81	-0,68	-0,71
UI	-0,81	1,00	0,83	0,89

Таким образом, индекс апвеллинга хорошо описывает изменчивость ветровых условий возникновения апвеллинга по среднемесячным данным и может использоваться для климатических исследований в районах, где отсутствуют регулярные измерения.

События апвеллинга в июне 2001 и 2019 гг. Рассмотрим более подробно условия возникновения апвеллингов в отдельные годы, когда наблюдались:

- высокая скорость и повторяемость ветров западных направлений и минимальная средняя температура воды (2001 г.);
- низкая повторяемость ветров западных направлений и максимальная средняя температура воды (2019 г.).

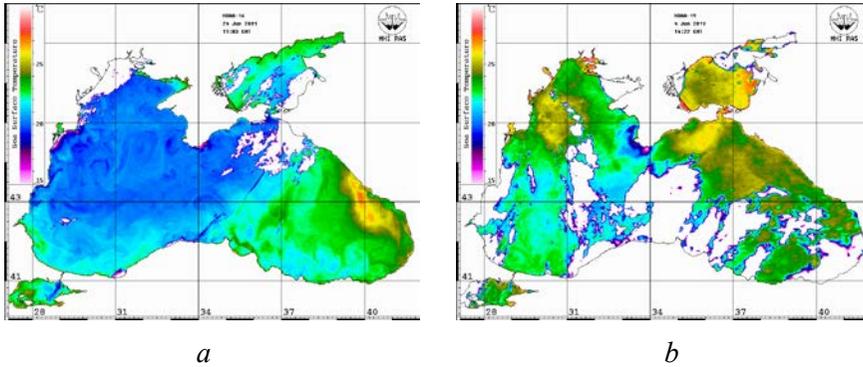
Апвеллинги в июне 2001 г. В июне 2001 г. наблюдалась самая низкая средняя температура воды ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$) и самая высокая средняя скорость ветра ($5,3\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) за исследуемый период. В этом месяце были зарегистрированы два апвеллинга (рис. 4, *c*). Первый – с резким понижением температуры с 17 до $9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ развился 5 июня в течение суток при устойчивом юго-западном ветре (рис. 4, *a*). Возникновению апвеллинга предшествовало усиление ветра до $16\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. При этом индекс апвеллинга принял аномально высокое значение $3600\text{ м}^3\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$ (рис. 4, *b*). Апвеллинг закончился 10 июня при смене направления ветра на юго-восточное.



Р и с. 4. Направление ветра (красным цветом обозначены ветры западных направлений, черным – восточных) (*a*), индекс апвеллинга UI (*b*), температура воды T_w (синяя линия) и воздуха T_A (голубая линия), по данным дневных измерений в Кацивели (*c*) в июне 2001 г.

F i g. 4. Wind direction (red color indicates western winds, black color – eastern ones) (*a*), upwelling index UI (*b*), water temperature T_w (blue line) and air temperature T_A (light blue line) based on the daytime measurements in Katsiveli (*c*) in June 2001

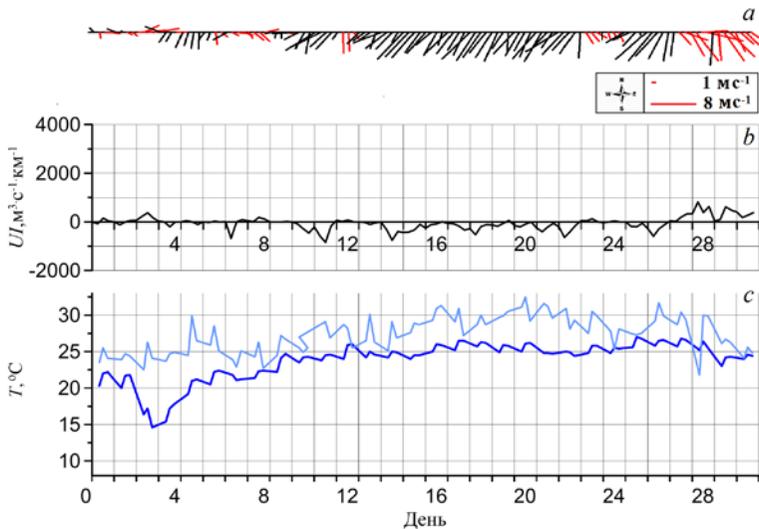
Аналогичные ветровые условия (продолжительный юго-западный ветер со скоростью до $6\text{--}10\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) вызвали длительный (с 23 по 30 июня) апвеллинг с понижением температуры воды почти на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4, *a, c*). Начинаящийся апвеллинг у Кацивели хорошо виден на спутниковом снимке 24 июня (рис. 5, *a*). При кратковременном (не более полусуток) ослаблении западного ветра 26 июня было зафиксировано повышение поверхностной температуры воды у берега. При усилении западного ветра до скорости $10\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ 27 июня температура снова опустилась до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Положительные значения индекса в третьей декаде июня согласуются с понижением температуры воды в эти дни (рис. 4, *b*).



Р и с. 5. Температура поверхности моря в 11:03 GMT 24 июня 2001 г. (NOAA 16) (a) и в 14:22 GMT 4 июня (NOAA-19) 2019 г. (b) из архива спутниковых карт с сайта http://dvs.net.ru/mp/index_ru.shtml

F i g. 5. Sea surface temperature at 11:03 GMT on June 24, 2001 (NOAA 16) (a) and at 14:22 GMT on June 4, 2019 (NOAA-19) (b) taken from the satellite map archive (website http://dvs.net.ru/mp/index_ru.shtml)

Апвеллинги в июне 2019 г. В 2019 г. наблюдалась максимальная для июня средняя температура воды по прибрежным измерениям – 23,8 °С (табл. 2). Единственный апвеллинг наблюдался в начале месяца, 3–5 июня (рис. 6, c). В это время температура опустилась с 22 до 14 °С. Апвеллинг был вызван резким усилением западного ветра до $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис. 6, a). Понижение температуры воды 4 июня хорошо видно на спутниковом снимке (см. рис. 5, b). В оставшиеся дни месяца апвеллинг не отмечался. Северо-западный ветер, наблюдаемый в конце месяца с 27 июня, сопровождался лишь незначительным понижением температуры.



Р и с. 6. То же, что на рис. 4, в июне 2019 г.

F i g. 6. The same as in Fig. 4, June 2019

Такая ситуация с малым числом апвеллингов была связана с низкой повторяемостью ветров западных направлений (рис. 6, a). В течение месяца

преобладал северо-восточный ветер, способствующий нагону теплой поверхностной воды к берегу и ее опусканию (даунвеллингу). Индекс апвеллинга большую часть месяца был отрицательным (рис. 6, *b*)

Анализ июньских данных за все годы (1992–2021 гг.) показал, что скорость ветра, приводящего к апвеллингу, в основном составляет от $5\text{--}6\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и выше при значении индекса, превышающем $520\text{ м}^3\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$. Такая скорость ветра соответствует результатам, полученным в работе [13]. Отметим, что с увеличением толщины прогретого слоя моря и усилением стратификации вод в термоклине в июле и августе эти значения могут увеличиваться.

По данным дневных измерений, температура воздуха в июне в основном была выше температуры воды. При отсутствии апвеллинга разница составляет $1\text{--}5\text{ }^\circ\text{C}$, при апвеллинге – увеличивается до $10\text{ }^\circ\text{C}$ и более.

Заключение

В работе исследовались ветровые условия возникновения апвеллинга у Южного берега Крыма в районе Кацевели с использованием ветрового индекса апвеллинга. Индекс представляет собой величину экмановского переноса воды от берега или к берегу, зависящую от направления и скорости вдольберегового ветра.

Получено, что условия возникновения апвеллинга меняются в зависимости от сезона года. В декабре, январе, июне и июле средний индекс апвеллинга имеет положительный знак, и экмановский перенос в основном направлен от берега вследствие высокой повторяемости ветров западных направлений. Это создает благоприятные условия для развития апвеллингов. В остальные месяцы знак индекса отрицательный, преобладает экмановский перенос воды к берегу, что создает условия для развития даунвеллингов.

Сравнение межгодовой изменчивости среднемесячных значений индекса апвеллинга и числа натуральных прибрежных наблюдений апвеллинга в июне показало высокую корреляцию между этими характеристиками с коэффициентом 0,88. Анализ, проведенный по 6-часовым данным наблюдений продемонстрировал хорошее соответствие между значениями индекса апвеллинга и измеренной температурой воды. Понижение температуры начинается с резкого усиления скорости ветра с западной составляющей в векторе скорости. Высокие положительные значения ветрового индекса, соответствующие высокой скорости ветра, предшествуют появлению низкой температуры воды у поверхности моря летом. Устойчивые ветры западных направлений могут поддерживать продолжительные апвеллинги. Ослабление западных ветров или смена направления ветра на восточное приводит к прекращению апвеллинга.

Результаты исследования показывают возможность использования ветрового индекса для изучения береговых экмановских апвеллингов, их прогноза, а также для климатических исследований в прибрежной зоне Южного берега Крыма. Актуальной задачей остается более детальный анализ условий возникновения апвеллинга с использованием ветрового индекса на временных масштабах часы – дни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Biological diversity of the coastal zone of the Crimean peninsula: problems, preservation and restoration pathways / V. N. Eremeev [et al.]. Sevastopol : Institute of Biology of the Southern Seas, 2012. 92 p.
2. Black Sea aquaculture: Legacy, challenges & future opportunities / F. Massa [et al.] // *Aquaculture Studies*. 2021. Vol. 21, iss. 4. P. 181–220. http://doi.org/10.4194/2618-6381-v21_4_05
3. *Arrigo K. R.* Marine microorganisms and global nutrient cycles // *Nature*. 2005. Vol. 437, iss. 7057. P. 349–355. <https://doi.org/10.1038/nature04159>
4. Характеристики состояния и эволюции гидрохимической структуры вод Черного моря / А. В. Вареник [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 6. С. 867–892. EDN NPXXNC.
5. 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. EDN AIEJPU. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-449-468>
6. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
7. *Checkley Jr D. M., Barth J. A.* Patterns and processes in the California Current System // *Progress in Oceanography*. 2009. Vol. 83, iss. 1–4. P. 49–64. <https://doi.org/10.1016/j.poccean.2009.07.028>
8. *Стельмах Л. В.* Методология комплексного мониторинга современного состояния фитопланктонного сообщества прибрежных вод Черного моря // *Системы контроля окружающей среды*. 2020. № 1. С. 21–26. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2020-1-21-26>
9. Развитие фитопланктона в зимне-весенний период в прибрежных водах Крыма / З. З. Финенко [и др.] // *Морской биологический журнал*. 2021. Т. 6, № 1. С. 102–114. <https://doi.org/10.21072/mbj.2021.06.1.08>
10. *Kostianaia E. A., Kostianoy A. G.* Regional climate change impact on coastal tourism: A case study for the Black Sea Coast of Russia // *Hydrology*. 2021. Vol. 8, iss. 3. 133. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030133>
11. *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
12. *Jacox M. G., Edwards C. A.* Effects of stratification and shelf slope on nutrient supply in coastal upwelling regions // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. Vol. 116, iss. C3. C03019. <https://doi.org/10.1029/2010JC006547>
13. 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. <https://doi.org/10.7868/S0030157416020222>
14. *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>
15. 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)
16. *Горячкин Ю. Н.* Апвеллинг у берегов Западного Крыма // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 5. С. 399–411. EDN YMQLYL. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-5-399-411>
17. *Станичная Р. Р., Станичный С. В.* Апвеллинги Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 4. С. 195–207. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207>

18. *Kubryakov A., Aleskerova A., Mizyuk A.* Submesoscale features of coastal upwellings in the Black Sea: Observations and modeling // *Continental Shelf Research*. 2024. Vol. 279. 105291. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2024.105291>
19. *Ловенкова Е. А., Полонский А. Б.* Климатические характеристики апвеллинга у побережья Крыма и их изменчивость // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 5. С. 44–52.
20. *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.
21. 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.
22. *Толстошеев А. П., Мотыжев 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. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-75-87>
23. *Симонова Ю. В., Станичный С. В., Лемешко Е. М.* Особенности проявления аномалий температуры поверхности Черного моря в районе Южного берега Крыма // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2024. Т. 21, № 3. С. 234–243. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-3-234-243>
24. *Сильвестрова К. П., Мысленков С. А., Репков Д. С.* Система прогноза ветровых апвеллингов для российского побережья Черного моря // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2022. № 1 (383). С. 89–107. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-89-107>
25. *Иванов В. А., Михайлова Э. Н.* Апвеллинг в Черном море. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 92 с.
26. *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>
27. *Bakun A.* Coastal upwelling indices, West Coast of North America, 1946–71. Seattle, WA, 1973. 103 p.
28. 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>
29. *González-Nuevo G., Gago J., Cabanas J. M.* Upwelling index: a powerful tool for marine research in the NW Iberian upwelling system // *Journal of Operational Oceanography*. 2014. Vol. 7, iss. 1. P. 47–57. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2014.11020152>
30. 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. <https://doi.org/10.3390/jmse10121849>
31. Variability of summer wind-driven upwelling along the Koryak Coast in the Northwestern Bering Sea based on satellite data / I. A. Zhabin [et al.] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022. Vol. 58, iss. 12. P. 1438–1449. <https://doi.org/10.1134/S0001433822120283>
32. *Mihailov M. E.* The Black Sea upwelling system: analysis on the western shallow waters // *Atmosphere*. 2024. Vol. 15, iss. 8. 999. <https://doi.org/10.3390/atmos15080999>
33. Coastal upwelling revisited: Ekman, Bakun, and improved upwelling indices for the U. S. West Coast / M. G. Jacox [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018. Vol. 123, iss. 10. P. 7332–7350. <https://doi.org/10.1029/2018JC014187>
34. Black Sea GIS developed in MHI / E. Zhuk [et al.] // *Proceedings of SPIE*. SPIE, 2016. Vol. 9688 : Fourth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment. (RSCy2016). 96881C. <https://doi.org/10.1117/12.2241631>

35. 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>

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 ResearcherID: 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

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

Касьяненко Валерия Юрьевна, студент, ФГАОУ ВО КФУ (295051, Россия, Симферополь, бул. Ленина, д. 5/7), valwicce@yandex.ru