

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-89-107>

УДК 551.465

Система прогноза ветровых апвеллингов для российского побережья Черного моря

К.П. Сильвестрова¹, С.А. Мысленков^{1,2,3}, Д.С. Репков⁴

¹ *Институт океанологии имени П.П. Ширишова*

Российской академии наук, Москва, Россия;

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;*

³ *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр*

Российской Федерации, Москва, Россия;

⁴ *ООО "ВАТСЕН", Севастополь, Россия*

stasocean@gmail.com

Представлена система прогноза ветровых экмановских апвеллингов для побережья Черного моря. Система основана на расчете критерия апвеллинга, который зависит от скорости и направления ветра и толщины верхнего квазиоднородного слоя. В качестве прогноза ветра используются данные модели COSMO-Ru07. Прогноз явлений апвеллинга в период с мая по ноябрь 2019 г. был рассчитан для трех точек у побережья Крыма с заблаговременностью 24-72 часа. Оценка качества прогнозов апвеллинга выполнена на основе данных измерений температуры воды в Балаклаве, Форосе и Партените. Сопоставление показало, что 50 % случаев значительного понижения температуры для Фороса и Балаклавы успешно прогнозируется с заблаговременностью 24–72 часа. Случаи значительного понижения температуры воды в исследуемом регионе наблюдаются редко, поэтому полученный результат является удовлетворительным. Часть случаев, которые система не спрогнозировала, вероятно, являются сгонными апвеллингами либо горизонтальной адвекцией холодных вод.

Ключевые слова: апвеллинг, Черное море, прогноз апвеллинга, COSMO-Ru07, температура воды

Wind upwelling forecast for the Russian Black Sea coast

K.P. Silvestrova¹, S.A. Myslenkov^{1,2,3}, D.S. Repkov⁴

¹ *Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;*

³ *Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;*

⁴ *WATSEN LLC, Sevastopol, Russia*

stasocean@gmail.com

The paper presents a forecast system for wind Ekman upwelling for the Black Sea coast. The system is based on the calculation of the upwelling criterion, which depends on the wind speed and wind direction and the thickness of the upper mixed layer. The archived wind forecast was extracted from the COSMO-Ru07 model. The upwelling forecast with a lead time of 24–72 hours was calculated for three points of the Crimean coast for the period from May to November 2019. The quality of upwelling forecasts was assessed using in situ water temperature measurements in Balaklava, Foros, and Partenit.

The comparison showed that 50% of the cases of a significant temperature decrease for Foros and Balaklava are successfully predicted with a lead time of 24–72 hours. The cases of the significant temperature drop are rare in the study region, so the result is unsatisfactory. A part of cases that were not predicted by the system are probably downsurge upwellings or the horizontal advection of cold water.

Keywords: upwelling, Black Sea, upwelling forecast, COSMO-Ru07, sea temperature

Введение

Апвеллинг – это подъем глубинных вод, который может быть вызван различными динамическими факторами. Когда апвеллинг происходит вследствие сильного и продолжительного вдольберегового ветра, его называют экмановским, если ветер направлен с берега, апвеллинг называют сгонным. Изменчивость поля температуры поверхности моря в зоне прибрежного апвеллинга определяется пространственно-временной структурой поля ветра, региональными геоморфологическими и гидрологическими особенностями [17]. В данной работе рассмотрены особенности системы прогноза ветровых экмановских апвеллингов для российского побережья Черного моря.

При апвеллинге на побережье Черного моря происходит резкое падение температуры воды, что негативно влияет на качество отдыха туристов [4]. Актуальность создания системы прогноза апвеллингов обусловлена тем, что Черное море является основной рекреационной акваторией для граждан России, особенно в условиях ограничений международного туризма, вызванных пандемией. По оценкам Министерства курортов и туризма Республики Крым [<https://mtur.rk.gov.ru/ru/article/show/2202>], только за первое полугодие 2021 года более 3 млн туристов посетили полуостров, в 2020 г. отдыхающих было более 6 млн. В Краснодарском крае туристический поток к сентябрю 2021 г. превысил 12 млн человек [https://admkrain.krasnodar.ru/content/1131/show/598174/?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop].

Помимо прямого воздействия на рекреационный потенциал, апвеллинг считается одним из основных процессов кросшельфового водообмена [27], при котором из глубинных слоев поднимается большое количество биогенных элементов, являющихся важным первичным звеном в пищевой цепи шельфовых экосистем.

Исследованию апвеллингов в Черном море посвящено достаточно большое количество статей [1, 3, 5, 7, 11, 16, 36 и др.]. В работах [2, 12] представлены первые современные исследования апвеллингов у побережья Крымского полуострова, позже по данным натурных исследований и моделирования апвеллинг у Южного берега Крыма исследован в работах [6, 7, 9, 14, 15, 17, 23, 28, 29].

Последние исследования также показали важность прогнозирования процессов апвеллинга, так как иногда подъем вод приводит не только к росту биологической продуктивности за счет поступления биогенных

веществ, но для Черного моря и к критическим заморам бентосных сообществ, при подъеме границы сероводородной зоны [24].

Работы по прогнозированию апвеллингов для Черного моря авторам неизвестны. Для других районов Мирового океана существуют системы прогноза, как правило, основанные на гидродинамических моделях. В 1973 году в техническом отчете NOAA Национальной морской службой по рыболовству анализировались индексы прибрежного апвеллинга у западного побережья Северной Америки [25]. Методика расчета индекса апвеллинга была основана на расчете геострофического ветра по полю давления и затем экмановского переноса, направленного от берега. Данная методика используется во многих современных исследованиях, однако она была разработана для анализа сезонных апвеллингов, проявление которых закономерно возникает при смене типов атмосферной циркуляции, что позволяет найти время начала и окончания апвеллингового режима и не подходит для анализа синоптических и мезомасштабных апвеллингов в морях. Помимо анализа апвеллингов, данный принцип используется в моделях для прогнозирования времени весеннего перехода от даунвеллинга к апвеллингу, например в Северо-западной ассоциации сетевых систем наблюдения за океаном [<http://www.nanoos.org/products/j-scope/forecasts.php?forecast=2020-04&var=overview>]. Для Ботнического залива Балтийского моря, где апвеллинги проявляются довольно часто, была создана система ансамблевого прогноза апвеллинга, основанная на биогеохимической модели BALECO Финского метеорологического института [34], а также на сервисе COPERNICUS доступна модель для прогноза апвеллинга во всем Балтийском море [https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=BALTICSEA_ANALYSIS_FORECAST_PHY_003_006]. Для озера Мичиган на основе спутниковых данных радиометра высокого разрешения AVHRR проведена идентификация и классификация случаев апвеллинга, а затем проанализирован ветер для полученных событий, и на основе данных о ветре уже выполнен краткосрочный прогноз апвеллинга [33]. В работе [31] для прогноза апвеллинга у Африканского побережья используются технологии нейронных сетей, которые применяются к данным о ветре и спутниковым данным о температуре поверхности моря (ТПМ).

Современные гидродинамические модели позволяют успешно воспроизводить процессы апвеллинга/даунвеллинга [8, 30, 32]. Однако для корректной работы модели необходимо точно задать начальные и граничные условия. Для прибрежной зоны Черноморского побережья распределение температуры и солёности, как правило, неизвестно, и задается сезонное среднее с усвоением спутниковой температуры поверхности моря. Также усваиваются данные по уровню со спутниковых альтиметров, которые имеют существенные погрешности вблизи берега и низкое разрешение по времени, что приводит к ухудшению результатов моделирования. Следовательно, для прибрежных районов с характерным

пространственным масштабом 10–30 км и событий с синоптическим периодом (1–3 суток) в гидродинамических моделях возникают сложности с корректным заданием начальных и граничных условий. Упрощенные методы диагноза и прогноза апвеллингов имеют свои ограничения, однако в ряде случаев они могут быть более эффективны, чем гидродинамические модели.

Предлагаемая система прогноза ветровых экмановских апвеллингов основана на расчете критерия апвеллинга, который главным образом зависит от скорости и направления ветра и толщины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС). Преимуществами данной системы являются простота расчета и доступность входных данных. В настоящей работе выполнены тестовые прогнозы возникновения апвеллинга в прибрежной зоне Крымского полуострова и проведена их верификация на основе данных наблюдений.

Данные и методы

Предлагаемая система прогноза апвеллинга основана на методике определения критерия апвеллинга, предложенного в [10] и подтвержденного на натурных данных в районе г. Геленджика [20, 35]. Критерий апвеллинга отражает процесс поднятия к поверхности подтермоклинных вод с температурой около 10 °С. Критерий R_u рассчитывается следующим образом:

$$R_u = \tau_v t / f \rho_w H R_d,$$

где τ_v – вдольбереговая составляющая напряжения трения ветра; t – время квазистационарного действия апвеллингового ветра; f – параметр Кориолиса; ρ_w – плотность морской воды; H – толщина ВКС; R_d – локальный бароклинный радиус деформации Россби. Более подробно см. [19].

Апвеллинговый ветер направлен вдоль берега таким образом, что в Северном полушарии берег остается слева. Согласно формуле, если критерий $R_u \leq -1$, тогда подтермоклинные воды поднимаются под действием экмановского переноса и оказываются у поверхности моря. Диапазон критерия от -0.8 до -1 включен в анализ, так как в расчетах есть неопределенности из-за средних значений толщины ВКС и занижения моделью прогностических скоростей ветра. Знак критерия определяется направлением действия касательного напряжения трения ветра относительно берега. При значениях критерия -0.8 и менее происходит апвеллинг, и температура воды на поверхности может падать от текущих значений до 8–10 °С (в зависимости от температуры подтермоклинных вод). Таким образом, амплитуда колебаний ТПМ может быть разной. Для анализа оправдываемости прогноза апвеллинга падение ТПМ на 5 °С и более, согласно данным измерений, принимается значимым событием, поскольку существенно превышает суточный ход ТПМ в исследуемом районе. Если для такого значимого события $R_u \leq -0.8$, то прогноз считается успешным.

В качестве входных данных используются данные о прогнозе ветра на высоте 10 м мезомасштабной атмосферной модели COSMO-Ru07 [18]. Шаг по пространству модели COSMO-Ru07 составляет около 7 км, а шаг по времени 3 часа, использованы данные с заблаговременностью 72 часа. Сетка узлов модели COSMO-Ru07 представлена на рис. 1.

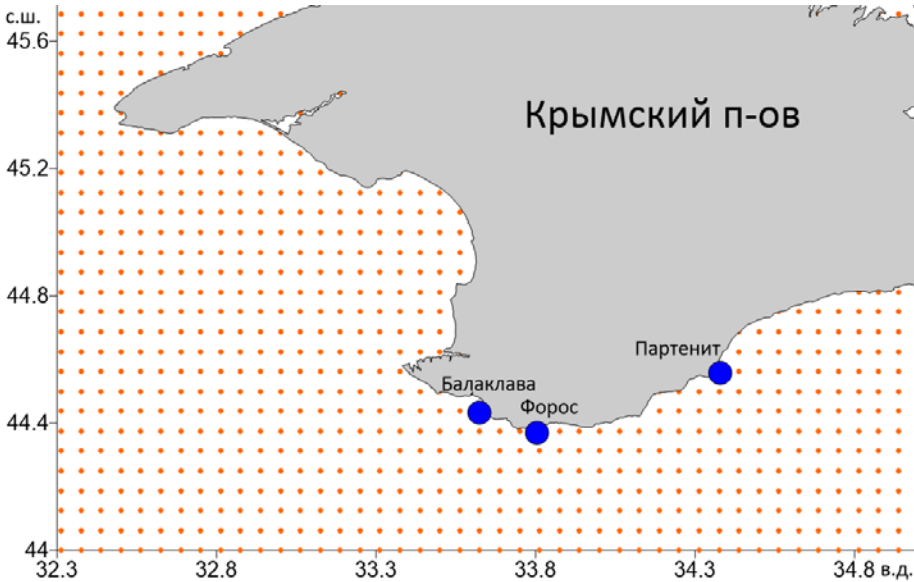


Рис. 1. Сетка узлов модели COSMO-Ru07 (оранжевые точки). Синими кружками отмечены точки, где проводились измерения температуры воды.
Fig. 1. COSMO-Ru07 grid (orange dots). The blue circles mark the points where the water temperature was measured.

Для расчета критерия апвеллинга также необходимо знать параметры морской среды, такие как плотность и толщина ВКС. Среднемесячные температура и соленость для расчета плотности взяты с портала ЕСИМО [http://portal.esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RIHMI-WDC_913¶meter=tempwater&sea=black&filter=workingstations] – вклад ошибки из-за разницы плотностей незначительный, поэтому использовались среднемесячные значения. Толщина ВКС принята равной климатическим среднемесячным оценкам (по натурным данным 1985–2017 гг.) из [13]. Этот параметр более важный и изменчивый, основные погрешности расчета возникают при ошибках в толщине ВКС. В перспективе толщина ВКС может усваиваться из гидродинамической модели или по натурным данным, в зависимости от района. В работе рассматривается теплый период года (май–ноябрь), так как именно в этот период сокращается толщина ВКС, а также становится возможным подтверждение наличия апвеллинга по данным ТПМ.

Для оценки качества прогноза апвеллингов были использованы данные о температуре воды, полученные в рамках российского проекта WatSen. Авторами проекта являются В.В. Елышев и Д.С. Репков, более подробное описание представлено на сайте [<https://watsen.info>]. Датчики состоят из автоматической платы с модулем GSM и выведенным во внешнюю среду цифровым термистором DS18B20 (точность ± 0.5 °C в диапазоне от -10 °C до +85 °C) (рис. 2). Плата помещена в герметичную пластиковую плавучесть. Проект WatSen стартовал в 2016 г., за это время вдоль береговой линии Крымского полуострова размещено 15 датчиков, с помощью которых выполнено более 330000 измерений температуры. Датчики заякорены таким образом, чтобы термистор находился на глубине не более 30 см, а удаление от берега не превышало 100 метров.



Рис. 2. Датчик температуры воды проекта WatSen.
Fig. 2. WatSen water temperature sensor.

Для тестирования системы прогноза выбрано 3 точки на побережье Крымского полуострова: Балаклава (44.488° с. ш., 33.618° в. д.), Форос (44.395° с. ш., 33.821° в. д.) и Партенит (44.586° с. ш., 34.353° в. д.). Выбор точек обусловлен наличием в них продолжительных рядов данных о температуре воды с датчиков WatSen за 2019 год. Для каждой из этих точек был собран архив данных о прогнозе ветра за 2019 год, который представляет собой ряд из 25 значений прогнозов один раз в сутки от 00 часов, с заблаговременностью до 75 ч с дискретностью 3 часа. Таким образом, получен ряд из значений прогноза скорости ветра для всего года, содержащий для каждого дня прогноз на 3 суток.

По входным данным для каждого срока прогноза рассчитаны касательное напряжение ветра (вдольбереговое и поперек берега) и параметр,

характеризующий вертикальную скорость подъема вод. Угол, определяющий направление берега и используемый в расчетах касательного напряжения трения ветра для поворота осей, взят для Балаклавы равным -55° , для Фороса -97° , а для Партенита -155° (отсчет угла идет от направления на север). После расчета вертикальной скорости проводилось интегрирование по времени и вывод значений критерия экмановского апвеллинга для разной заблаговременности (24, 48, 72 ч). Критерий апвеллинга рассчитывается на временном ряде и является накопительной величиной, т. е. он возрастает в случае продолжительного действия апвеллингового ветра, а при смене ветра обнуляется. Сменой ветра считается смена знака касательного напряжения трения ветра (имеется ввиду вдольбереговая составляющая). Было реализовано 2 варианта расчетов. Первый – когда в текущий день расчеты стартуют с 00 часов. Второй – «сквозной» расчет, когда значения параметров сохраняются для прогноза на 24 часа от текущего дня, а в расчетах для последующих суток используются в качестве стартовых значений. Таким образом, в первом варианте присутствует эффект «холодного» старта, при длительном воздействии апвеллингового ветра (более 2 суток) сквозной расчет более предпочтителен.

Результаты

Прогноз критерия апвеллинга с заблаговременностью 24–72 ч был рассчитан ежедневно для трех точек в Крыму для периода с мая по ноябрь 2019 года. В таблице приведена статистика для всех случаев, когда температура понижалась на 5°C и более в течение 1–2 суток, и соответствующие значения прогноза критерия апвеллинга. Анализ событий из таблицы показал, что для Балаклавы и Фороса больше половины событий понижения температуры согласуются с низкими значениями критерия апвеллинга. Для Партенита критерий апвеллинга не согласуется с понижениями температуры.

По данным измерений в 2019 году для Балаклавы зарегистрировано 8 случаев значимого понижения ТПМ (рис. 3). Однако, как видно из таблицы, не все случаи значительного охлаждения вод поверхностного слоя отражаются в значениях прогноза критерия апвеллинга. Так, во время события начала июля, когда ТПМ менее чем за сутки опустилась на 11.3°C , максимальное значение критерия апвеллинга составило -0.61 (-0.61) и зарегистрировано для прогноза от 3 июля на 48 часов.

Согласно прогнозу, ветер был восточного и северо-восточного направления, что для Балаклавы более похоже на сгонный, а не экмановский апвеллинг. К тому же предыдущее событие, подтвердившиеся по прогнозу (27–29 июня), предварительно сильно подняло термоклин к поверхности, ТПМ уже упала на 6°C , затем в течение нескольких суток при отсутствии ветра была релаксация апвеллинга, и далее 3 июля начался сгон теплых вод. В этом случае термоклин явно залегал выше, т. е. ВКС был значительно меньше, чем в расчете, отсюда недооценка критерия.

С 8 по 10 июня был еще один эпизод апвеллинга, предсказанный прогнозом только с заблаговременностью 72 ч от 6 июля, значение критерия апвеллинга -1.03 (-1.03). Необходимо отметить, что продолжительность события была более суток.

Таблица. Случаи значительного понижения ТПМ и прогноз критерия апвеллинга (R_u) за период май-октябрь 2019 г. Критерий апвеллинга рассчитан в двух вариантах: без разгона и при «сквозном» расчете, значения «сквозного» расчета указаны в скобках. Жирным шрифтом выделены события, когда рассчитанный критерий составляет -0.8 или менее

Table. Cases of a significant decrease in SST and the value of the upwelling criterion (R_u) for May-October 2019. The upwelling criterion was calculated in two versions: "cold start" and "hot start" from previous day, the values of the "hot start" calculation are indicated in brackets. Some events marked bold type, these are with criterion -0.8 or less

Дата	Местоположение	Перепад температуры воды, °С	Max T воды, °С	Min T воды, °С	Продолжительность события, ч	R_u , прогноз на 24 ч	R_u , прогноз на 48 ч	R_u , прогноз на 72 ч
27-28 июня	Балаклава	6.3	26.3	20	16	-1.48 (-2.4)	-1.2 (-1.2)	-2.23 (-2.27)
3-4 июля	Балаклава	11.3	23	11.7	10	-0.33 (-0.46)	-0.61 (-0.61)	-0.16 (-0.16)
6-7 июля	Балаклава	5.8	25.1	19.3	20	-0.03 (-0.03)	-0.03 (-0.03)	-0.04 (-0.04)
8-10 июля	Балаклава	10.7	22.5	11.8	39.5	-0.33 (-0.54)	-0.12 (-0.12)	-1.03 (-1.03)
20-22 июля	Балаклава	5	25.3	20.3	39	-0.49 (-0.89)	-0.34 (-0.34)	-0.6 (-0.6)
4-5 августа	Балаклава	8.2	22.3	14.1	18	-1.19 (-1.19)	-0.94 (-0.94)	-1.1 (-1.1)
6-7 августа	Балаклава	5.8	25.1	19.3	34	-0.06 (-0.08)	-1.3 (-1.3)	-1.03 (-1.03)
16-18 августа	Балаклава	5.2	26.6	21.4	32	-0.86 (-1.37)	-1.26 (-1.26)	-1.99 (-1.99)
2-3июня	Форос	8.1	20.8	12.7	26	0.02 (0.02)	-0.03 (-0.03)	-0.03 (-0.03)
27-29 июня	Форос	5.4	26.2	20.8	40	-0.86 (-1.13)	-2.15 (-2.42)	-1.34 (-1.34)
1-2 июля	Форос	5.1	22.6	17.5	25	-1.03 (-3.79)	-2.68 (-3.8)	-3.04 (-3.31)
3-4 июля	Форос	11.1	21.5	10.4	10	-0.04 (-0.04)	-0.48 (-0.48)	-1.95 (-4.7)
6-7 июля	Форос	14	24	10	17	-0.34 (-0.34)	-0.37 (-0.37)	-0.2 (-0.2)
8-9 июля	Форос	10	23.5	13.5	22.5	-0.62 (-0.87)	-1.49 (-1.54)	-1.59 (-1.59)
12-13 июля	Форос	7.3	19.7	12.4	17	-0.59 (-0.86)	-0.89 (-0.89)	-0.58 (-0.58)
13-14 июля	Форос	5.4	20	14.6	14.5	-0.52 (-1.39)	-1.13 (-1.4)	-0.44 (-0.44)

30 июля - 1 августа	Форос	8.9	26.1	17.2	40	-0.42 (-0.73)	-0.68 (-0.68)	-0.46 (-0.46)
4 августа	Форос	12	24.8	12.8	10	-2.55 (-2.55)	-2.38 (-2.38)	-2.55 (-2.55)
6-7 августа	Форос	5.1	19.6	14.7	11	-0.27 (-3.01)	-2.92 (-2.92)	-2.72 (-2.72)
10-11 августа	Форос	5.7	24.1	18.4	33	-0.16 (-0.17)	-0.51 (-0.51)	0
26-28 мая	Партенит	5.3	18.5	13.2	38.5	-0.07 (0.12)	-0.2 (-0.2)	-0.45 (-0.45)
29-30 мая	Партенит	5.2	21.5	16.3	7	0	0	0.01 (0.01)
31 мая - 2 июня	Партенит	5.5	23.7	18.2	35	-0.01 (-0.01)	-0.03 (-0.03)	0
2-3 июля	Партенит	8.5	22.8	14.3	11	-0.22 (-0.35)	-0.23 (-0.29)	-0.32 (-0.32)
8-9 июля	Партенит	9	23	14	10.5	-0.28 (-0.34)	-0.39 (-0.39)	-0.45 (-0.45)

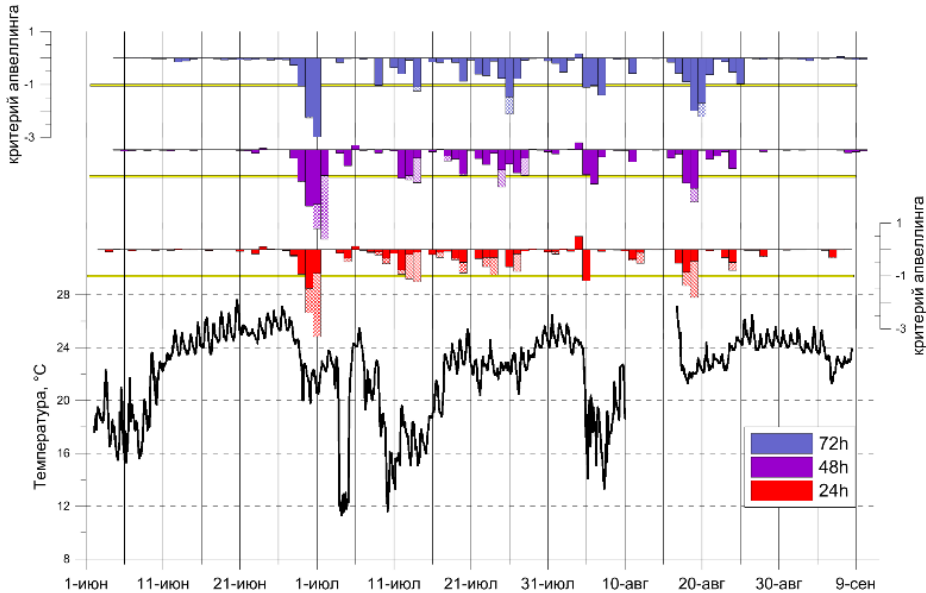


Рис. 3. Изменение ТПМ по данным буя WATSEN в Балаклаве и критерия апвеллинга. Красными столбцами показаны значения критерия апвеллинга для заблаговременности 24 ч (красной штриховкой, значения критерия апвеллинга при «сквозном» расчете), фиолетовыми столбцами – то же для заблаговременности 48 ч, синими столбцами – для заблаговременности 72 ч, черной линией показана температура воды.

Fig. 3. SST change according to the data of the WATSEN buoy in Balaklava and the upwelling criterion. The red columns show the values of the upwelling criterion for a lead time of 24 h (red shading, the values of the upwelling criterion in the "hot start" calculation), the purple columns show the same for a lead time of 48 h, the blue columns for a lead time of 72 h, the black line shows the water temperature.

Далее в период с 11 по 13 июля по прогнозу был полный апвеллинг, ТПМ опустилась до 15°C . Еще одно значимое падение температуры произошло через неделю, 20–22 июля, ветер был восточный и северо-восточный, значения критерия апвеллинга менялись от -0.34 до -0.89 для разных заблаговременностей. Интенсивное событие 4–5 августа было предсказано в обоих расчетах и с разной заблаговременностью, следующее за ним повторное понижение температуры было в прогнозе с заблаговременностью 48 и 72 ч. Последнее событие в этом сезоне было предсказано с заблаговременностью 24 и 48 ч, зафиксированный перепад температуры воды составил 5.2°C .

Согласно расчетам, был всего один случай ложного прогноза апвеллинга на 25–26 июля (заблаговременность 48 и 72 ч), ТПМ понизилась только через сутки на 3°C . Во всех остальных случаях хотя и не было полного апвеллинга, все же наблюдалось значительное понижение температуры. Из наблюдаемых 8 событий, представленных в таблице, успешно спрогнозированы с заблаговременностью 24 и 48 ч – 4 события, 5 событий из 8 предсказано за 72 ч. Еще для 2 событий критерий апвеллинга имел значения менее -0.5 , что говорит о значительном подъеме термоклина и также может отображаться на ТПМ.

Согласно рассчитанным значениям, критерий апвеллинга опускался ниже порогового значения от 4 до 15 раз в зависимости от прогноза для Фороса (рис. 4). Для 14 случаев наблюдалось понижение температуры, подтвержденное данными буя (с июня по сентябрь), падения температуры составили от 2°C до 15°C . Событие 3 июля не было точно спрогнозировано за 24 и 48 ч (был прогноз на полный апвеллинг с 29 июня по 2 июля), а с заблаговременностью 72 часа критерий достигал порогового значения 29, 30 июня, 1 и 3 июля. После этого события температура воды опять повторно упала до 10°C 7 июля, но значения критерия апвеллинга менялись от -0.2 до -0.37 .

По данным спутниковых снимков от 6 июля, в это время напротив Фороса находился вихрь, который вполне мог привести к подъему охлажденных вод, поднявшихся за несколько дней до этого благодаря экмановскому апвеллингу. О взаимодействии апвеллинга и вихрей говорится в [7, 22, 26]. В Форосе довольно часто наблюдались значения критерия апвеллинга, превышающие пороговое значение в несколько раз, это может быть связано с тем, что наблюдается положительный тренд толщины ВКС, связанный с интенсификацией летних штормов, согласно [13]. Для расчетов в данной работе толщина ВКС с июня по август изменялась в пределах 8.8 – 10.2 м.

Из наблюдаемых 12 событий, представленных в таблице, 7 предсказано за 24 и 48 ч, с заблаговременностью 72 ч предсказано 6 событий, при этом еще во время 2 событий критерий апвеллинга был менее -0.5 .

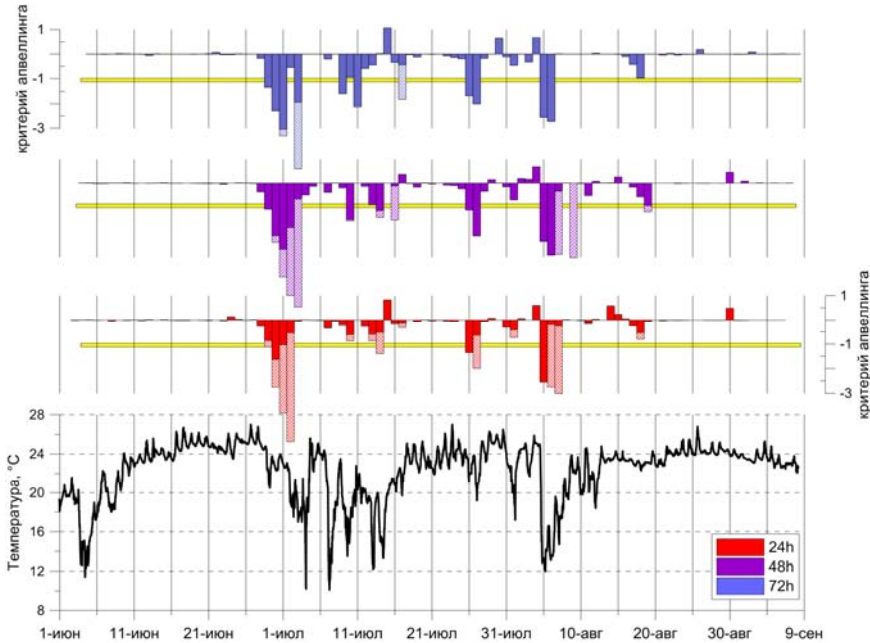


Рис. 4. Изменение ТПМ по данным буя WATSEN в Форосе и критерия апвеллинга. Красными столбцами показаны значения критерия апвеллинга для заблаговременности 24 ч (красной штриховкой, значения критерия апвеллинга при «сквозном» расчете), фиолетовыми столбцами – то же для заблаговременности 48 ч, синими столбцами – для заблаговременности 72 ч, черной линией показана температура воды.

Fig. 4. SST change according to the data of the WATSEN buoy in Forsos and the upwelling criterion. The red columns show the values of the upwelling criterion for a lead time of 24 h (red shading, the values of the upwelling criterion in the "hot start" calculation), the purple columns show the same for a lead time of 48 h, the blue columns for a lead time of 72 h, the black line shows the water temperature.

Согласно рассчитанным значениям, критерий апвеллинга в Партените не опускался ниже порогового значения (рис. 5), однако здесь наблюдалось три значительных падения температуры, которые были приурочены к тем же событиям, которые наблюдались в других исследуемых районах. Основные понижения температуры зарегистрированы 3 и 9 июля. В данном случае значительные понижения температуры, вероятно, вызваны адвекцией или динамикой вод. Прогнозирование для данного района усложняется из-за расположения буя рядом с мысом Аю-Даг и горой Аю-Даг, которые служат естественным препятствием для юго-западного ветра – апвеллингового для восточного побережья Крыма. В то же время континентальный склон довольно близко расположен к берегу именно в районе Партенита. Квазисинхронность возникновения аномалий температуры с предыдущими районами обусловлена конфигурацией береговой черты.

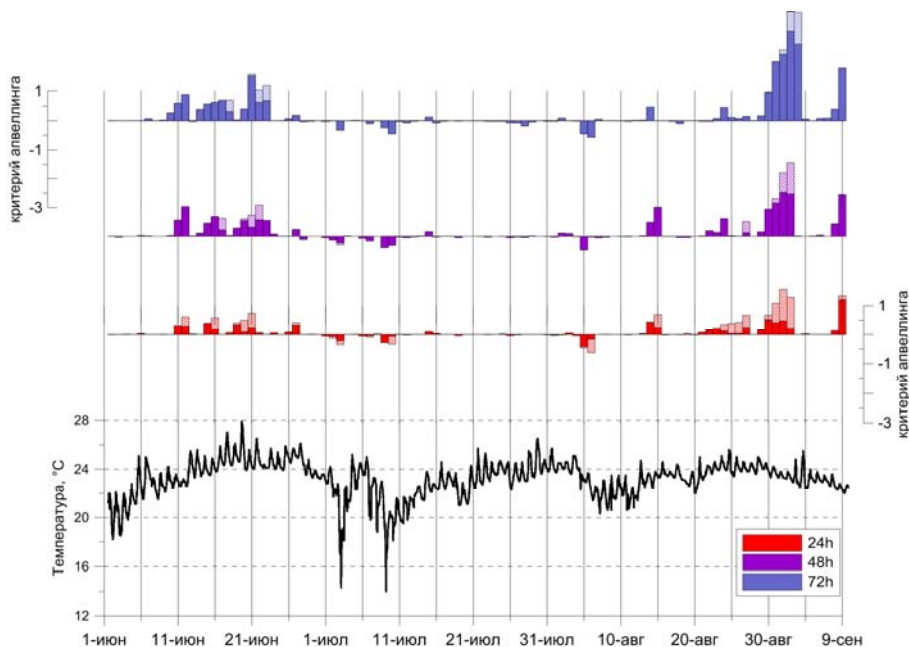


Рис. 5. Изменение ТПМ по данным буя WATSEN в Парените и критерия апвеллинга. Красными столбцами показаны значения критерия апвеллинга для заблаговременности 24 ч (красной штриховкой, значения критерия апвеллинга при «сквозном» расчете), фиолетовыми столбцами – то же для заблаговременности 48 ч, синими столбцами – для заблаговременности 72 ч, черной линией показана температура воды.

Fig. 5. SST change according to the data of the WATSEN buoy in Balaklava and the upwelling criterion. The red columns show the values of the upwelling criterion for a lead time of 24 h (red shading, the values of the upwelling criterion in the "hot start" calculation), the purple columns show the same for a lead time of 48 h, the blue columns for a lead time of 72 h, the black line shows the water temperature.

Обсуждение

Существуют несколько факторов, которые влияют на возникновение апвеллинга. Помимо продолжительности действия апвеллингового ветра, не менее важным является направление фонового потока в исследуемом районе. Если течение действует «сонаправленно» ветру, то апвеллинг может возникать и при более слабых ветрах, однако если происходит интенсификация Основного черноморского течения (ОЧТ), то это будет иметь «запирающий» эффект для Южного берега Крыма. Стоит также упомянуть, что Южный берег Крыма сам по себе является активной динамической зоной, врезающийся в море полуостров стоит на пути ОЧТ, что приводит к частому вихребразованию. Вихри в свою очередь способны сами по себе поднимать холодную воду из более глубоких слоев. На побережье Крыма в некоторых мелководных зонах, таких как

побережье от о. Долгий до м. Тарханкут, от м. Меганом до Керченского пролива, часто возникает именно сгонный апвеллинг [17]. Однако несмотря на сложную природную систему Черного моря, мы можем довольно точно спрогнозировать более половины случаев интенсивного и резкого падения температуры. Для более успешного прогноза необходимо параметризовать процесс сгонного апвеллинга, а также учитывать фоновое течение. Форма проявления апвеллинга на морской поверхности для данного района определяется не только контуром береговой линии, скоростью и направлением ветра, но и взаимодействием апвеллинга с окружающими разномасштабными динамическими структурами [22].

Ранее проверка системы прогноза была проведена по данным термоксы, закоренной в акватории заповедника Утриш (44.719° с. ш. и 37.434° в. д.). При достижении рассчитанным критерием апвеллинга -0.9 падение температуры воды на поверхностном датчике составило $2-3.5^{\circ}\text{C}$, температура на придонных датчиках изменялась на $5-13^{\circ}\text{C}$ (что свидетельствовало о подъеме термоклина) [21].

Заключение

На основе методики определения критерия апвеллинга и прогноза ветра COSMO-Ru07 была создана система прогноза апвеллинга для побережья Черного моря. Оценка качества прогнозов апвеллинга выполнена на основе данных прямых измерений температуры воды в Балаклаве, Форосе и Партените. Сопоставление данных о ТПМ с прогнозом критерия апвеллинга показало, что 50 % случаев значительного понижения температуры (на 5°C и более) для Фороса и Балаклавы успешно прогнозируются и, вероятно, являются экмановскими апвеллингами. Однако для оценки разницы в оправдываемости прогнозов разной заблаговременности выборка была недостаточной. Часть случаев понижения температуры, которые система не спрогнозировала, вероятно, являются сгонными или повторными апвеллингами либо горизонтальной адвекцией холодных вод. Для Партенита в теплый сезон 2019 года по данным архивного прогноза ветра экмановских апвеллингов не зарегистрировано, соответственно, резкие понижения ТПМ предсказаны системой не были.

В дальнейшем предполагается доработка системы прогноза включением варианта сгонных апвеллингов (с оценкой их вероятности для конкретных пунктов), а также с данными из оперативных гидродинамических моделей для описания фонового потока. В перспективе прогнозы будут визуализированы в виде карт для Черноморского побережья Российской Федерации.

Работа К.П. Сильвестровой выполнена при финансовой поддержке гранта президента № МК-709.2021.1.5. Работа С.А. Мысленкова выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Анализ данных выполнен в рамках темы госзадания FMWE-2021-0002.

Список литературы

1. *Архипкин В.С.* Гидрология прибрежного апвеллинга Черного и Каспийского морей: Дис. ... канд. геогр. наук. – М., 1996.
2. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма). Киев: Наукова думка, 1992. 242 с.
3. *Блатов А.С., Тужилкин В.С.* Среднемасштабные вихри и синоптическая изменчивость в Мировом океане // Итоги науки и техники. Серия Океанология. 1990. Т. 8. 248 с.
4. *Боровская Р.В., Боровская К.В.* Роль апвеллинга в рекреационной деятельности Крыма // Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 2015. Т. 53. С. 19-28.
5. *Боровская Р.В., Ломакин П.Д., Панов Б.Н., Спиридонова Е.О.* Структура и межгодовая изменчивость характеристик прибрежного черноморского апвеллинга на основе данных спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2008. № 2. С. 26-36.
6. *Власенко В.И., Стацук Н.М., Иванов В.А., Романов А.С., Внуков Ю.Л.* Исследование влияния прибрежного апвеллинга на динамику полей кислорода и сероводорода в шельфовой зоне Черного моря // Океанология. 2002. Т. 42. № 3. С. 348–355.
7. *Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В.* Циклонические вихри апвеллингового происхождения у юго-западной оконечности Крыма // Исследование Земли из космоса. 1998. № 3. С. 83-88.
8. *Демьшев С.Г., Кочергин С.В., Кочергин В.С.* Построение поля течений в Черном море на основе вихреразрешающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солености // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. Вып. 15. С. 215-226.
9. *Джиганишин Г.Ф., Полонский А.Б., Музылева М.А.* Апвеллинг в северо-западной части Черного моря в конце летнего сезона и его причины // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 4. С. 45-57.
10. *Зацепин А.Г., Сильвестрова К.П., Куклев С.Б., Пиотух В.Б., Подымов О.И.* Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга-даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИОРАН в Черном море // Океанология. 2016. Т. 56, № 2. С. 203-214.
11. *Иванов В.А., Михайлова Э.Н.* Апвеллинг в Черном море. Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2008. 92 с.
12. *Иванов В.А., Янковский А.Е.* Длинноволновые движения в Черном море Киев: Наукова думка, 1992. 112 с.
13. *Кубряков А.А., Белокопытов В.Н., Зацепин А.Г., Станичный С.В., Пиотух В.Б.* Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5 (209). С. 449-468. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-5-449-468
14. *Михайлова Э.Н., Музылева М.А.* Ветровые условия возникновения апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у ЮБК // Системы контроля окружающей среды. 2007. С. 284-286.
15. *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. № 20. С. 160-170.

16. Новиков А.А., Тужилкин В.С. Сезонные и региональные вариации синоптических аномалий температуры воды в северо-восточной части прибрежной зоны Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 42-52.

17. 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.

18. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полохов А.А., Ревокатова А.П., Татаринovich Е.В., Чурылин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложениия // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 37-53.

19. Сильвестрова К.П. Прибрежные апвеллинги в северо-восточной части Черного моря: связь с ветром и течением: Дис. ... канд. геогр. наук. М., 2019.

20. 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.

21. Сильвестрова К.П., Пузина О.С., Мысленков С.А. Прогноз ветровых апвеллингов и его сравнение с данными термоксы, установленной в заповеднике Утриш в 2020 г. // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: Год науки и технологий в РФ – Десятилетие наук об океане ООН». 2021. С. 316-318.

22. Станичная Р.Р., Станичный С.В. Апвеллинги Чёрного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 4. С. 195-207.

23. Щуров С.В., Субботин А.А., Троценко О.А., Богданова Т.А. и др. Исследование апвеллингов в районе мидийной фермы в бухте Ласпи (Черное море) // Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона: материалы VIII Международной конференции. Керчь, 26-27 июня 2013 г. 2013. С.157-164.

24. Островский А.Г., Сильвестрова К.П., Соловьев Д.М., Зацепин А.Г., Очередник В.В., Подымов О.И., Федоров А.В. Квази-инерционные внутренние волны в апвеллингах над континентальным склоном северо-восточной части Черного моря // 19-я Международная конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 266. DOI 10.21046/19DZZconf-2021a

25. Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946-71 // NOAA Tech. Rep NMFS SSRF-671. U.S. Dept. of Commerce, 1973.

26. Brannigan L. Intense submesoscale upwelling in anticyclonic eddies // Geophysical Research Letters. 2016. Vol. 43, no. 7. P. 3360-3369.

27. Crise A., Kaberi H., Ruiz J., Zatsepın A., Arashkevich E., Giani M. et al. A MSFD complementary approach for the assessment of pressures, knowledge and data gaps in Southern European Seas: The PERSEUS experience // Marine pollution bulletin. 2015. Vol. 95, no 1. P. 28-39.

28. Gawarkiewicz G., Korotaev G.K., Stanichny S.V. et al. Synoptic upwelling and cross-shelf transport processes along Crimean coast of the Black Sea // *Contin. Shelf Res.* 1999. Vol. 19. P. 977-1005.
29. Goryachkin Y.N. Upwelling nearby the Crimea Western Coast // *Physical oceanography.* 2018. Vol. 25, no. 5. P. 368-379.
30. Korotaev G., Oguz T., Dorofeyev V., Demyshev S., Kubryakov A., Ratner Y. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system. *Ocean Science // Ocean Science*, 2011. Vol. 7, no. 5. DOI: 10.5194/os-7-629-2011.
31. Kriebel S.K.T., Brauer W., Eifler W. Coastal upwelling prediction with a mixture of neural networks // *IEEE transactions on geoscience and remote sensing.* 1998. Vol. 36, no. 5. P. 1508-1518. DOI: 10.1109/36.718854.
32. Mizyuk A.I., Puzina O.S., Senderov M.V. Accuracy of the reconstructed temperature in the Black Sea upper layer from nowcasting/forecasting systems // *Journal of Physics: Conference Series.* 2018. C. 012146. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012146.
33. Plattner S., Mason D.M., Leshkevich G. A., Schwab D.J., Rutherford E.S. Classifying and forecasting coastal upwellings in Lake Michigan using satellite derived temperature images and buoy data // *Journal of Great Lakes Research.* 2006. Vol. 32, no. 1. P. 63-76.
34. Roiha P., Westerlund A., Haavisto N. Forecasting upwelling events with monthly ensembles for the eastern coast of the Gulf of Bothnia in the Baltic Sea // *Journal of Operational Oceanography.* 2016. Vol. 9, no. 2. P. 115-125.
35. Silvestrova K.P., Myslenkov S.A., Zatsepin A.G. Variability of wind-driven coastal upwelling in the North-eastern Black Sea in 1979-2016 according to NCEP/CFR data // *Pure and Applied Geophysics.* 2018. Vol. 175, no. 11. C. 4007-4015.
36. Sur H. Í., Özsoy E., Ünlüata Ü. Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // *Progress in Oceanography.* 1994. Vol. 33, no. 4. P. 249-302.

References

1. Arkhipkin V.S. Hidrologiya pribreznogo apvellinga Chernogo i Kaspiskogo morey: Dis. ... kand. geogr. nauk. Moscow, 1996 [in Russ].
2. Blatov A.S., Ivanov V.A. Hidrologiya i gidrodinamika shel'fovoy zony Chernogo morya (na primere Yuzhnogo berega Kryma). Kiev, Naukova dumka publ., 1992, 242 p. [in Russ].
3. Blatov A.S., Tuzhilkin V.S. Srednemashtabnye vihri i sinopticheskaya izmenchivost' v Mirovom okeane. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya Okeanologiya*, 1990, vol. 8, 248 p. [in Russ].
4. Borovskaya R.V., Borovskaya K.V. The role of upwelling in recreational activities of Crimea. *Trudy Yuzhnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo khozyaistva i okeanografii*, 2015, vol. 53, pp. 19-28 [in Russ].
5. Borovskaya R.V., Lomakin P.D., Panov B.N., Spiridonova E.O. Structure and Interannual Variability of Characteristics of Inshore Black Sea Upwelling on Basis of Satellite Monitoring Data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2008, no. 2, pp. 26-36 [in Russ].
6. Vlasenko V.I., Stashchuk N.M., Ivanov V.A., Romanov A.S., Vnukov Yu.L. Research of the coastal upwelling effect on the dynamics of the oxygen and hydrogen

sulfide fields in the Black Sea shelf area. *Okeanologiya [Oceanology]*. 2002, vol. 42, no. 3, pp. 348-355 [in Russ.].

7. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Soloviev D.M., Stanichnyy S.V. Cyclonic eddies of upwelling origin near the southwestern tip of Crimea. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth Observation and Remote Sensing]*, 1998, no. 3, pp. 83-88 [in Russ.].

8. Demyshev S.G., Kochergin S.V., Kochergin V.S. Postroenie polya techeniy v Chernom more na osnove vihrerazreshayushchey modeli s assimilyaciey klimaticheskikh poley temperatury i solenosti. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*, 2007, vol. 15, pp. 215-226 [in Russ.].

9. Dzhiganshin G.F., Polonskii A.B., Muzyleva M.A. Upwelling in the northwest part of the Black sea at the end of the Summer season and its causes. *Physical Oceanography*, 2010, vol. 20, no. 4, pp. 281-293.

10. Zatsepin A.G., Silvestrova K.P., Piotoukh V.B., Kuklev S.B., Podymov O.I. Observations of a cycle of intense coastal upwelling and downwelling at the research site of the Shirshov institute of oceanology in the Black sea. *Oceanology*, 2016, vol. 56, no. 2, pp. 188-199.

11. Ivanov V.A., Mihaylova E.N. Apvelling v Chernom more [Upwelling in the Black Sea]. Sevastopol', NPC "EKOSI-Gidrofizika", 2008, 92 p. [in Russ.].

12. Ivanov V.A., Yankovskiy A.E. Dlinnovolnovoye dvizheniya v Chernom more Kiev, Naukova dumka, 1992, 112 p. [in Russ.].

13. Kubryakov A.A., Belokopytov V.N., Zatsepin A.G., Stanichny S.V., Piotoukh V.B. The Black Sea Mixed Layer Depth Variability and Its Relation to the Basin Dynamics and Atmospheric Forcing. *Physical Oceanography [e-journal]*, 2019, vol. 26, no. 5, pp. 397-413. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-5-397-413.

14. Mihaylova E.N., Muzyleva M.A. Vetrovye usloviya vozniknoveniya apvellinga v severo-zapadnoy chasti CHernogo morya i u YUBK. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy [Monitoring systems of environment]*, 2007, pp. 284-286 [in Russ.].

15. Mihaylova E.N., Muzyleva M.A., Polonskiy A.B. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' harakteristik apvellinga v severo-zapadnoy chasti CHernogo morya i u poberezh'ya Kryma v 2005-2008 gg. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*, 2009, vol. 20, pp. 160-170 [in Russ.].

16. Novikov A.A., Tuzhilkin V.S. Seasonal and regional variations of water temperature synoptic anomalies in the Northeastern coastal zone of the Black sea. *Physical Oceanography*, 2015, no 1, pp. 39-48 [in Russ.].

17. Polonskii A.B., Muzyleva M.A. Modern spatial-temporal variability of upwelling in the North-western Black Sea and off the Crimea coast. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*, 2016, no. 4, pp. 96-108 [in Russ.].

18. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Shatunova M.V., Chubarova N.Ye., Alferov D.Yu., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Kopeykin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovich E.V., Churiulin E.V. COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications. *Gidrometeorologicheskie*

issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 37-53 [in Russ.].

19. *Sil'vestrova K.P.* Pribrezhnye apvellingi v severo-vostochnoy chasti Chernogo morya: svyaz's vetrom i techeniem: Dis. ... kand. geogr. nauk. Moscow, 2019 [in Russ.].

20. *Sil'vestrova K.P., Zatsepin A.G., Myslenkov S.A.* Coastal upwelling in the Gelendzhik area of the Black sea: effect of wind and dynamics. *Oceanology*, 2017, vol. 57, no. 4, pp. 469-477.

21. *Sil'vestrova K.P., Puzina O.S., Myslenkov S.A.* Wind upwelling forecast and its comparison with the thermistor chain data in the Black Sea (Utrish Reserve) in 2020. *The Seas of Russia: Year of Science and Technology in the RF – United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development*, 2021, pp. 316-318 [in Russ.].

22. *Stanichnaya R.R., Stanichny S.V.* Black Sea upwellings. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 195-207 [in Russ.].

23. *Shchurov S.V., Subbotin A.A., Troshchenko O.A., Bogdanova T.A.* i dr. Issledovanie apvellingov v rayone midiynoy fermy v buhte Laspi (Chernoe more). *Sovremennye rybohozyaystvennyye i ekologicheskie problemy Azovo-CHernomorskogo regiona: materialy VIII Mezhdunarodnoy konferencii. Kerch', 26-27 june 2013.*, 2013, pp.157-164 [in Russ.].

24. *Ostrovskiy A.G., Sil'vestrova K.P., Solov'ev D.M., Zatsepin A.G., Ocherednik V.V., Podymov O.I., Fedorov A.V.* Kvazi-inercionnye vnutrennie volny v apvellingah nad kontinental'nym sklonom severo-vostochnoy chasti Chernogo moray. 19-ya Mezhdunarodnaya konferencii «Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa». *Elektronnyy sbornik materialov konferencii. Moscow, IKI RAN publ.*, 2021, p. 266. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a [in Russ.].

25. *Bakun A.* Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946-71. *NOAA Tech. Rep NMFS SSRF-671*. U.S. Dept. of Commerce, 1973.

26. *Brannigan L.* Intense submesoscale upwelling in anticyclonic eddies. *Geophysical Research Letters*, 2016, vol. 43, no. 7, pp. 3360-3369.

27. *Crise A., Kaberi H., Ruiz J., Zatsepin A., Arashkevich E., Giani M.* et al. A MSFD complementary approach for the assessment of pressures, knowledge and data gaps in Southern European Seas: The PERSEUS experience. *Marine pollution bulletin*, 2015, vol. 95, no 1, pp. 28-39.

28. *Gawarkiewicz G., Korotaev G.K., Stanichny S.V. et al.* Synoptic upwelling and cross-shelf transport processes along Crimean coast of the Black Sea. *Contin. Shelf Res.*, 1999, vol. 19, pp. 977-1005.

29. *Goryachkin Y.N.* Upwelling nearby the Crimea Western Coast. *Physical oceanography*, 2018, vol. 25, no. 5, pp. 368-379.

30. *Korotaev G., Oguz T., Dorofeyev V., Demyshev S., Kubryakov A., Ratner Y.* Development of Black Sea nowcasting and forecasting system. *Ocean Science. Ocean Science*, 2011, vol. 7, no. 5. DOI: 10.5194/os-7-629-2011.

31. *Kriebel S.K.T., Brauer W., Eifler W.* Coastal upwelling prediction with a mixture of neural networks. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1998, vol. 36, no. 5, pp. 1508-1518. DOI: 10.1109/36.718854.

32. *Mizyuk A.I., Puzina O.S., Senderov M.V.* Accuracy of the reconstructed temperature in the Black Sea upper layer from nowcasting/forecasting systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, p. 012146. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012146.

33. Plattner S., Mason D.M., Leshkevich G. A., Schwab D.J., Rutherford E.S. Classifying and forecasting coastal upwellings in Lake Michigan using satellite derived temperature images and buoy data. *Journal of Great Lakes Research*, 2006, vol. 32, no. 1, pp. 63-76.

34. Roiha P., Westerlund A., Haavisto N. Forecasting upwelling events with monthly ensembles for the eastern coast of the Gulf of Bothnia in the Baltic Sea. *Journal of Operational Oceanography*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 115-125.

35. Silvestrova K.P., Myslenkov S.A., Zatsepin A.G. Variability of wind-driven coastal upwelling in the North-eastern Black Sea in 1979-2016 according to NCEP/CFSR data. *Pure and Applied Geophysics*, 2018, vol. 175, no. 11, pp. 4007-4015.

36. Sur H.Í., Özsoy E., Ünlüata Ü. Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea. *Progress in Oceanography*, 1994, vol. 33, no. 4, pp. 249-302.

*Поступила 22.12.2021; одобрена после рецензирования 17.03.2022;
принята в печать 30.03.2022.*

*Submitted 22.12.2021; approved after reviewing 17.03.2022;
accepted for publication 30.03.2022.*