

В.А.Иванов¹, Т.Я.Шульга¹, И.А.Свищева¹,
Р.Р.Станичная¹, А.В.Гусев^{2,3}

¹Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

²Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН, г.Москва

³Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г.Москва

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В РАЙОНЕ ГЕРАКЛЕЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Проведено моделирование гидродинамические процессы в Черном море в 2017 г. с использованием реальных атмосферных данных модели реанализа *Skiron*. Численные расчеты выполнены на основе трехмерной нелинейной σ -модели циркуляции океана *INMOM*. Выходные данные модели сравниваются с данными наблюдений поверхностных проявлений внутренних волн, зарегистрированных в прибрежной зоне Южного берега Крыма со спутников *Landsat-8*, *Sentinel-2* в 2017 г. Проведен анализ изменчивости модельных полей температуры и скорости течений в районе обнаружения поверхностных проявлений внутренних волн на спутниковых снимках. Выполнен спектральный анализ колебаний уровня Черного моря и кинетической энергии течений на шельфе Крымского побережья. Выявлены детали баротропной региональной динамики приливов K_1 , M_2 , реконструированные по модельным данным в исследуемом регионе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *внутренние волны, трехмерная сигма-координатная модель, приливные эллипсы, спектральный анализ, Крымского побережье*

doi: 10.22449/2413-5577-2019-4-22-32

Эта статья была задумана Виталием Александровичем Ивановым – широко известным в нашей стране и за рубежом крупным организатором науки, занимавшимся исследованием изменчивости гидрофизических процессов в Мировом океане и организацией мониторинга морской среды. Данное исследование было выполнено в рамках регионального проекта «Характеристики внутренних волн в районе Гераклейского полуострова: проявление, моделирование, влияние на экосистему», руководителем которого он являлся. Эта статья – дань памяти Иванову Виталию Александровичу, замечательному ученому, учителю и человеку.

Колебания атмосферного давления, ветра, резкие изменения рельефа морского дна, приливообразующие силы являются основными причинами, вызывающими внутренние волны в океане. Эти волны, отражающие колебания плотности и распространяющиеся вдоль изолиний плотностной стратификации океана, оказывают существенное влияние на процессы перемешивания [1] и на увеличение потока органического углерода [2]. Возможные механизмы генерации внутренних волн до сих пор являются предметом

© **В.А.Иванов**, Т.Я.Шульга, И.А.Свищева,
Р.Р.Станичная, А.В.Гусев, 2019

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.4. С.22-32.

активных дискуссий и исследований [3, 4]. Источниками этих возмущений являются различные виды деформации поля плотности и скорости течений. Одним из индикаторов мест генерации внутренних волн может являться баротропное приливное воздействие, показанное в [5, 6] для районов Иберийского шельфа и Мозамбикского канала.

Исследование проведено для региона черноморского побережья – прибрежной зоны Южного берега Крыма, для которой впервые стали доступны снимки поверхности моря с высоким разрешением и небольшим временным сдвигом. Анализ поверхностных проявлений внутренних волн в Черном море по спутниковым изображениям позволяет определять районы их генерации, направления и скорость их распространения [7]. Увеличение числа открытых источников данных дистанционного зондирования высокого разрешения позволило зарегистрировать пакеты движущихся внутренних волн в районе Гераклейского п-ова в зоне прибрежного апвеллинга. Их анализ делает возможным проведение прямого сравнения пространственно-временных параметров внутренних волн с результатами численного моделирования.

В настоящей работе обсуждаются результаты моделирования, выполненного с использованием данных атмосферного реанализа *Skiron* за 2017 г. Численные эксперименты проведены с целью воспроизведения условий, при которых реальные атмосферные возмущения приводят к появлению внутренних волн. Интерпретация результатов численных расчетов совместно с анализом спутниковых данных позволит выявить основные факторы, сопутствующие возникновению внутренних волн. Данная работа является продолжением исследований, представленных в [8], посвященных совместному анализу пространственно-временных характеристик внутренних волн на шельфе Крымского побережья по данным спутниковых наблюдений и теоретических расчетов. Систематизированные результаты этого исследования визуализированы в веб-атласе открытого доступа в сети интернет <https://qgiscloud.com/April/WebAtlasWaves2>.

Материалы и методы. Морские шельфы являются потенциальными местами, приводящими к образованию горизонтально-неоднородных волн и появлению пограничных волновых образований, связанных с изменениями глубины моря [9]. Прибрежные районы Черного моря, характеризующиеся как особенностями топографии дна и неоднородностью береговой линии, так и близким положением струи Основного Черноморского течения (ОЧТ), являются участками возможной генерации внутренних волн. Исследуемая область, расположенная в северо-западной части побережья Черного моря, вблизи Гераклейского п-ова, является одним из таких районов (рис. 1).

Обширная область материкового шельфа, расположенного к юго-востоку и к северу от Гераклейского п-ова имеет существенные различия в строении рельефа дна. В зависимости от ширины шельфовой области ее можно условно разделить на три зоны. Первая – Каламитский залив, область с наиболее широким шельфом, отмеченная цифрой «1» на рис. 1, а. Вторая – между Севастополем и крайней юго-западной оконечностью Крымских гор, здесь шельф наиболее узкий (цифра «2» на рис. 1, а). Восточнее располагается третья зона, простирающаяся до Ялты, с материковой отмелью в форме полукруга, выдающегося к югу, и шириной, достигающей 30 – 40 км (цифра «3» на рис. 1, а).

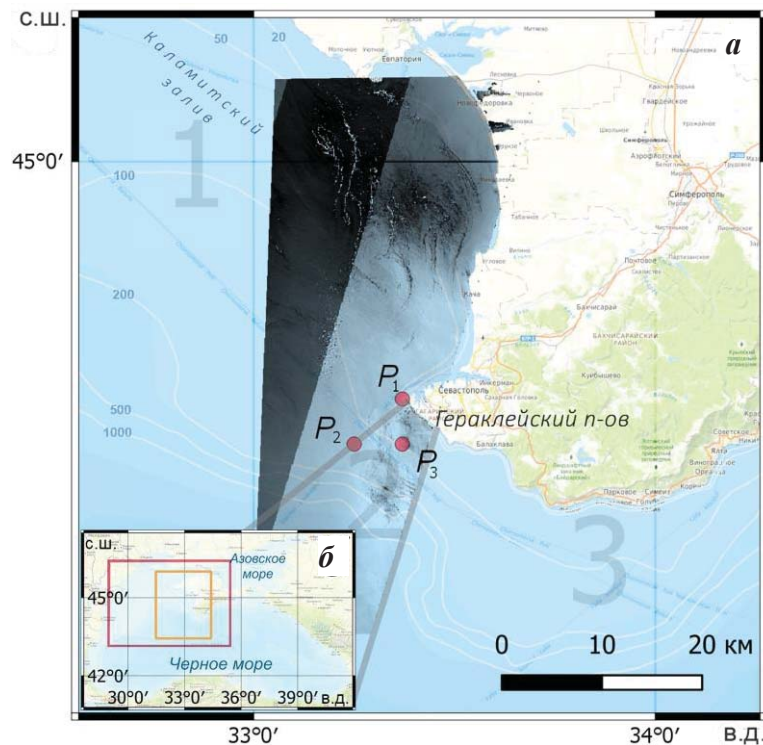


Рис. 1. Карта области исследования (а), объединенная с изображением морской поверхности со спутника Sentinel-2 29 июня 2017 г. Серыми линиями обозначены условные границы зон 1, 2 и 3, ранжированные по ширине шельфа. Красными точками показано местоположение пунктов P_1 , P_2 и P_3 , в которых обсуждаются результаты моделирования. На вставке (б) представлены границы: I – области моделирования (в рамке); II – области, для которой рассчитаны приливные эллипсы (красный прямоугольник); III – области, для которой анализировалось изменения основных метеорологических параметров (желтый прямоугольник). Светлыми контурными линиями отмечена глубина в метрах.

Влияние сезонного пикноклина, топографии дна и приливных течений определяет условия неустойчивости и разрушения внутренних волн. Это подтверждается анализом доступных спутниковых снимков, позволяющем обнаруживать и описывать поверхностные проявления внутренних волн [7 – 9]. Исследование поверхностных проявлений внутренних волн в данном районе выполнено по спутниковым наблюдениям за 2017 г. Для этого используются снимки высокого разрешения со спутников Sentinel-2 и Landsat-8, источником которых являются ресурсы открытого доступа (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, <https://earthexplorer.usgs.gov/б>, <http://glovis.usgs.gov/б>).

Особый интерес этого исследования представляют участки шельфа Черного моря, для которых были обнаружены самые отчетливые последовательные спутниковые снимки проявлений внутренних волн в 2017 г. Эти участки обозначены точками на рис.1 (P_1 (44,58° с.ш., 33,37° в.д.), P_2 (44,50° с.ш.,

33,25° в.д.) и P_3 (44,50° с.ш., 33,37° в.д.) и используются в дальнейшем для анализа результатов трехмерного моделирования.

Численное моделирование проводится с использованием модели общей циркуляции океана *INMOM* (*Institute Numerical Mathematics Ocean Model*), разработанной в Институте вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН [10]. Трехмерная модель основана на системе примитивных уравнений гидродинамики океана, записанной в приближениях несжимаемости, гидростатики и Буссинеска. В качестве вертикальной координаты используется безразмерная переменная σ . Расчетная сетка модели, соответствующая области I на рис.1, \bar{b} , охватывает акваторию Черного и Азовского морей (40°54'36" – 47°16'12" с.ш. и 27°26'60" – 41°45'00" в.д.) и имеет пространственное разрешение 0,05° × 0,04° по широте и долготе соответственно. В вертикальном направлении используется изобатическая система координат, в которой размер шага задается при помощи неравномерно распределенных по глубине σ -уровней. Глубине моря 2 км соответствуют следующие шаги сетки: 1 м в верхнем 5 м поверхностном слое, 5 м – в слое от 5 до 20 м, 10 м – в слое от 20 до 60 м, 50 м – в слое от 60 до 300 м, 100 м – в слое от 300 до 800 м, ниже которого он был увеличен до 200 м. Расчетный шаг по времени 5 мин. Профили температуры и солёности, используемые в качестве начальных в модели *INMOM*, взяты из климатологических ежемесячных средних значений. Расчет проводится в течение 365 сут, начало расчета отсчитывается от 1 января 2017 г.

Движение внутренних волн, возникающих на границе раздела слоев жидкости различной плотности, оказывает существенное воздействие на процессы перемешивания и на вертикальный обмен в море. Стандартная процедура, обеспечивающая необходимый уровень смешивания, состоит в использовании параметризации Ричардсона для вертикальной вязкости ν и коэффициента диффузии η , введенная в [11]:

$$\nu = \nu_0(1 + \alpha Ri)^{-n} + \nu_b, \quad \eta = \nu(1 + \alpha Ri)^{-n} + \eta_b.$$

Здесь $Ri = N^2(z)/(u_z^2 + v_z^2)$ – число Ричардсона; $u_z = \partial u/\partial z$ и $v_z = \partial v/\partial z$ – компоненты вертикального сдвига горизонтальной скорости; $N^2(z) = g(\partial\rho/\partial z)/\rho$ – частота плавучести, где g – ускорение силы тяжести, ρ – плотность морской воды; $\nu_b = \eta_b = 10^{-5}$ м²/с – коэффициенты фоновой вязкости и диффузии; $\nu_0 = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м²/с, $\alpha = 5$, $n = 2$. Коэффициенты горизонтальной вязкости и диффузии были выбраны постоянными и равными 0,5 м²/с.

Задание атмосферных возмущений в модели выполнено с использованием данных региональной атмосферной модели *Skiron*, базирующейся на мезомасштабной численной атмосферной *Eta*-модели. Основное развитие модели было обеспечено *NCEP* (*National Centers for Environmental Prediction*) [12]. Используемый вариант *SKIRON/Eta* модели представляет собой 72-часовой прогноз метеорологических параметров для Азово-Черноморского и Средиземноморского бассейнов. Вывод данных осуществляется через 2 ч на сетке с шагом 0,1° по широте и долготе. Модель предоставляет 16 различных параметров, обеспечивающих обмен данными между океаном и атмосферой, 8 из которых учитываются в настоящих расчетах: атмосферное давление, меридиональная и зональная составляющие скорости ветра, потоки

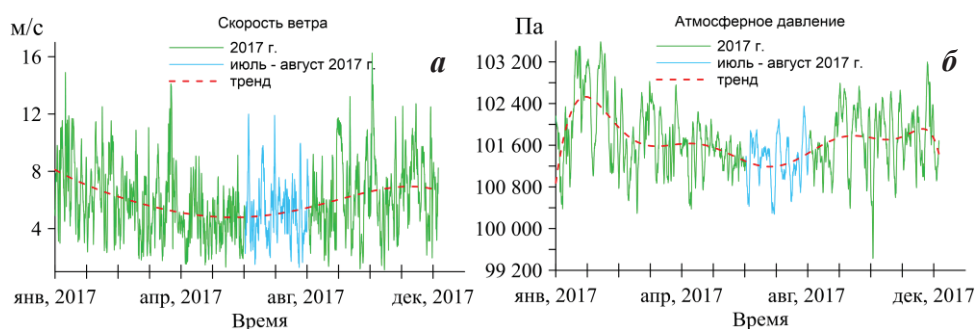
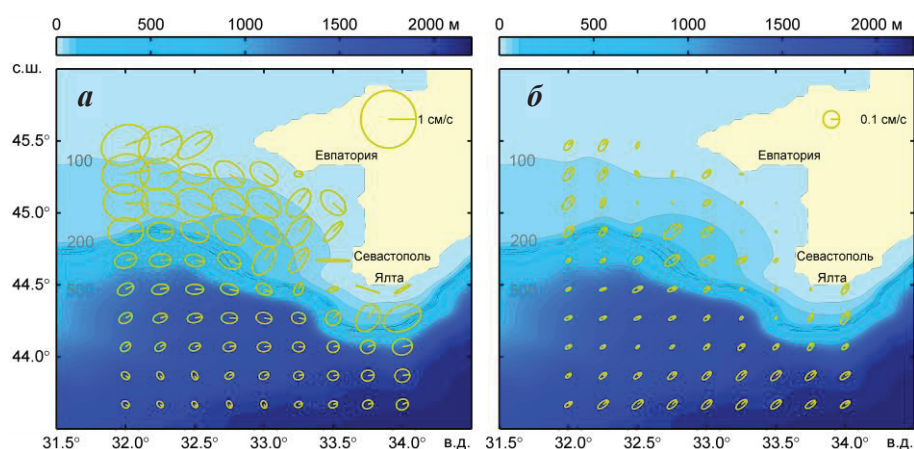


Рис. 2. Изменения со временем осредненных по пространству значений скорости ветра (а) и приземного атмосферного давления (б) в районе ГераклеЙского п-ова в 2017 г. Синие сегменты соответствуют рассматриваемому в анализе периоду с июля по август.

падающей коротковолновой и длинноволновой радиации, температура и влажность воздуха, осадки.

Сезонные особенности основных метеорологических параметров (скорость ветра и приземное атмосферное давление) анализировались в области, охватывающей исследуемый район, примыкающий к ГераклеЙскому п-ову. Координаты границ этой области, отмеченной на рис.1, б красным прямоугольником (II), изменяются в пределах от 29,0 до 35,5° в.д. и от 43,2 до 46,4° с.ш. Для этой области проведено пространственное осреднение используемых годовых наборов данных *SKIRON/Eta* модели. Временной ход средних по пространству значений модуля скорости ветра и приземного атмосферного давления показан на рис.2. На основании анализа эволюции средней скорости ветра (рис.2, а) отметим, что наибольшие ее значения приходятся на весенний (16,26 м/с) и осенний (14,9 м/с) сезоны. Летом в среднем скорость ветра меньше, чем в другие сезоны, ее величина составляет 4 – 8 м/с и только в пяти случаях в период с июля по август достигает максимальных значений 10 – 12 м/с (рис.2, а, синяя линия). На летний сезон приходятся также относительно небольшие колебания приземного атмосферного давления, более низкого по сравнению с его средним значением в течение всего года. Анализируя ход кривых, отмеченных на рис.2, б синим цветом, отметим, что перепад атмосферного давления с июля по август (1002,7 – 1023,5 гПа) составил 20,8 гПа, а его годовых значений (994,3 – 1035,8 гПа) 41,5 гПа (рис.2, б, зеленая линия).

Анализ и обсуждение результатов. Приливное воздействие инициализировано в модели путем добавления дополнительных периодических членов в правой части уравнений баланса импульса [13]. Отметив, что в районе ГераклеЙского п-ова отчетливые пакеты внутренних волн были обнаружены 11 июля и 28 августа 2017 г., баротропные приливы проанализированы за период с июля по август 2017 г. Для этого использованы данные о скорости течений, воспроизведенные моделью *INMOM*. По этим данным построены карты приливных эллипсов, полуоси которых характеризуют скорости баротропных приливов, позволяющие выделить районы, подверженные более интенсивному приливному воздействию. Целью этого эксперимента являлось сравнение расположения районов, подверженных наибольшему приливному



Р и с . 3 . Баротропные приливные эллипсы для компонент K_1 (а) и M_2 (б) в июле – августе 2017 г. Карта с дискретизацией каждые 5 точек сетки создана с помощью пакета *Matlab R2012a*. Глубина моря на контурах в метрах.

воздействию, с положением пакетов внутренних волн, обнаруженных на спутниковых снимках.

На рис.3 показаны эллипсы приливного течения для приливных гармоник с наибольшими амплитудами – суточной (K_1 – 23,93 ч) и полусуточной (M_2 – 12,42 ч). Параметры приливных эллипсов рассчитаны в области III, выделенной на рис.1, б желтым прямоугольником. Координаты границ этой области изменяются в пределах от 31,5 до 34,5° в.д. и 43,5 – 46,0° с.ш. Баротропные эллипсы соответствуют усредненным модельным данным зональной и меридиональной скорости течений в каждом пятом узле сетки в области III. Расчет параметров эллипсов выполнен согласно теории наименьших квадратов и представлении приливных вариаций конечным числом гармонических членов [14, 15].

Амплитуды приливных течений, соответствующие главным осям эллипсов, и отметки локальных углов наклона к горизонтальной оси показаны на рис.3. Как видно, баротропные приливы, в основном, ориентированы с севера на юг в западной части исследуемой области и с запада на восток у южного побережья. Эллипсы рассматриваемых гармоник K_1 и M_2 сосредоточены в мелководной части континентального склона, особенно в юго-западной части 1-ой шельфовой зоны. Максимум приливных скоростей K_1 находится в мелководной части Каламитского залива вдоль изобат 20 – 100 м (рис.3, а). Вдоль большей части западного сектора 1-ой шельфовой зоны преобладающим направлением скорости является юго-восточное.

На приведенных картах приливных эллипсов для компоненты K_1 (рис.3, а) видно, что в центральной части, вблизи Евпатории, приливные течения совершают поворот, характеризующийся изменением направления больших полуосей эллипсов, по сравнению с течениями западной части Каламитского залива. В центральной части отмечается поворот приливных эллипсов на 90° относительно направлений в его западном секторе, указывающий на северо-восточное направление течений. Затем между Евпаторией и Саки происходит обратное вращение на – 90°, приводящее к смене направления

течений на юго-восточное. У побережья Ялты (3-я шельфовая зона) преобладает северо-восточное направление скорости. Углы главных осей эллипсов приливных течений M_2 аналогичны на шельфе углам K_1 . Из рис.2, б видно, что влияние течения M_2 является меньшим, чем K_1 не только во 2-ой шельфовой зоне, но и на 1-ом шельфовом участке. Здесь ее существенные значения отмечаются только в глубоководной части Каламитского залива.

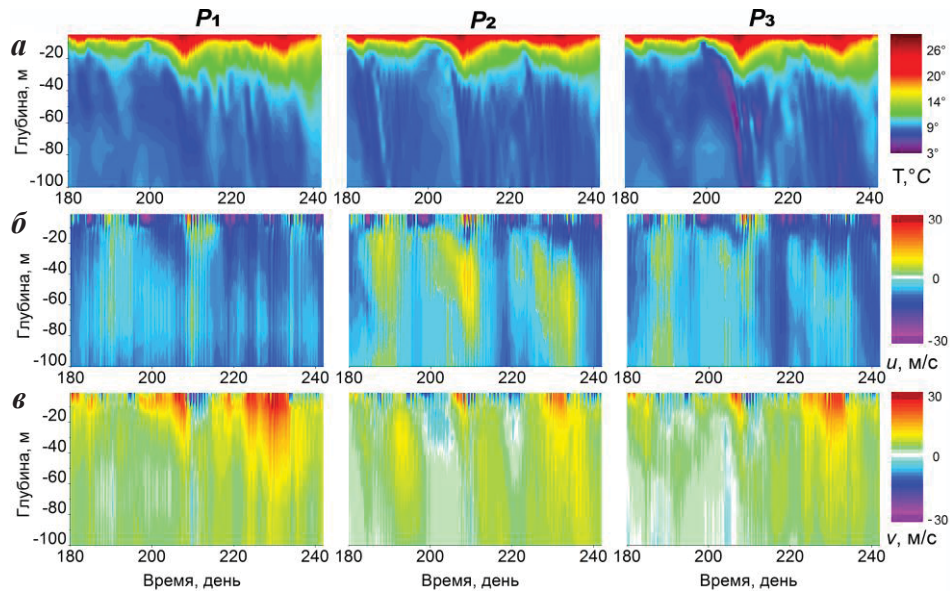
Таким образом, районы локализации приливных эллипсов со значимыми скоростями и, следовательно, подверженные наибольшему баротропному приливному воздействию, находятся в 1-ой и 3-ей шельфовых зонах (рис.1). Это подтверждается отсутствием поверхностных проявлений внутренних волн на спутниковых снимках для 2-ой шельфовой зоны в 2017 г. Для сравнения в таблице показано, что в 1-ой и 3-ей шельфовых зонах зарегистрированы 7 и 2 случая проявления внутренних волн соответственно.

Прогнозируемые по модели *INMOM* поля температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости течений в слое 100 м приведены на рис.4. Исследуемые поля анализируются в пунктах P_1 , P_2 и P_3 , находящихся в районе обнаружения поверхностных проявлений внутренних волн на спутниковых снимках. В этих пунктах анализируются результаты моделирования за период с 1 июля по 31 августа (с 181 по 242 день) 2017 г., выбранные из годового набора данных.

Во всех рассматриваемых пунктах горизонтальная структура изменения температуры в верхнем 20-ти метровом слое рис.4, а демонстрирует отчетливую периодичность. Граница температуры в этом слое может быть аппроксимирована практически не деформированной синусоидальной волной, минимумы которой приходятся на 210 и 235 сут. В пункте P_3 виден выход холодной воды к поверхности, проникающей в верхний слой моря, возможный в результате воздействия внутренних колебаний. В этом случае распространение волны вызывает колебание изопикны, изменяющее, в свою очередь, поле скорости течений, создающей градиент поверхности моря, зарегистрированный в близкий по времени период на спутниковых снимках.

Т а б л и ц а . Поверхностные проявления внутренних волн, зарегистрированные на спутниковых снимках в 2017 г.

шельфовая зона	дата	ИСЗ	направление, румб	длина волны, м
1	30 мая	<i>Sentinel-2</i>	северо-восток	817
	25 июня	<i>Landsat-8</i>	север – северо-запад	1064
	26 июня	<i>Sentinel-2</i>	восток – северо-восток	707
	11 июля	<i>Sentinel-1</i>	восток	528
		<i>Sentinel-2</i>		901
	28 августа	<i>Sentinel-2</i>	юг – юго-восток	791
		<i>Landsat-8</i>		731
3	26 июня	<i>Sentinel-2</i>	северо-восток	391
	13 сентября	<i>Landsat-8</i>	восток – юго-восток	1142

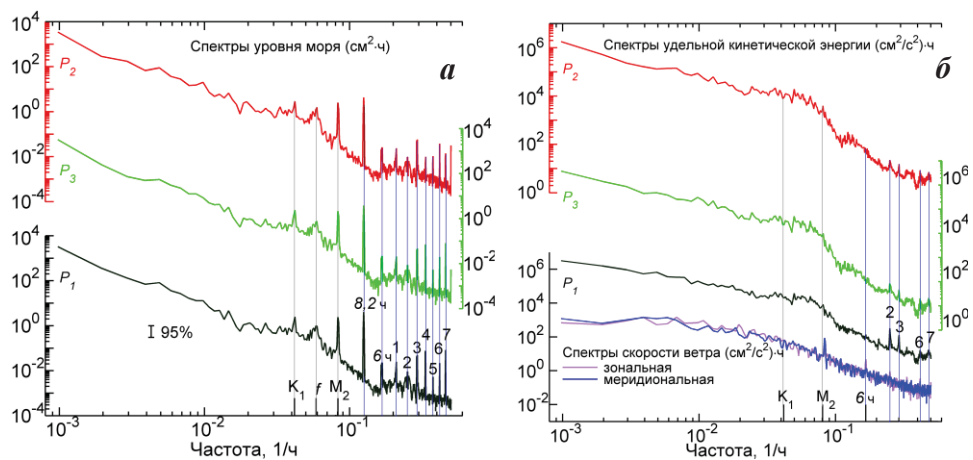


Р и с . 4 . Температура (а), зональная (б) и меридиональная (в) составляющие скорости течений в слое 100 м, полученные по результатам моделирования в пунктах: P_1 , (слева), P_2 (по центру) и P_3 (справа).

Это подтверждается при сравнении модельных временных рядов скорости (рис.4, б и в), демонстрирующих их согласованность как в диапазоне скоростей, так и в наличии трех периодов резких изменений направлений в верхнем слое моря, отвечающих колебаниям температуры. Таким образом, анализ данных моделирования показывает, что время обнаружения проявлений внутренних волн на спутниковых снимках достаточно успешно согласуется с воспроизведенными моделью колебаниями полей температуры и скорости течений.

Исследование распределение энергии колебаний уровня по частоте выполнено в пунктах P_1 , P_2 и P_3 с помощью быстрого преобразования Фурье. Спектры колебаний уровня Черного моря и удельной кинетической энергии рассчитаны для годовых наборов почасовых модельных данных *INMOM*, полученных с использованием реанализа *Skiron* за 2017 г. Общая длина рядов составляет 8760 ч. Расчет спектров выполнен с помощью стандартного метода Уэлча пакета *Matlab R2012a* с использованием окна Хамминга [12] длиной 42,7 сут и половинным перекрытием. В этом случае на спектральную оценку приходится $K = 32$ степеней свободы, а частотное разрешение спектра отвечает $\Delta f \approx 0,000717$ цикл/ч. Предварительно для каждого пункта проведено сглаживание модельных рядов данных с использованием процедуры скользящего среднего, исключаяющего шум с периодом 4 ч и менее.

На рис.5, а представлены спектры колебаний уровня моря на станциях P_1 , P_2 и P_3 , расположенных на шельфе Крымского побережья, и спектры составляющих скорости приводного ветра, осредненных по пространству в области III (рис.1, б). Спектры представлены в логарифмических координатах. По оси абсцисс отложены частоты, по оси ординат – значения спектральной плотности колебаний уровня моря и скорости ветра.



Р и с . 5 . Спектральная плотность колебаний уровня моря (а) и энергетические спектры удельной кинетической энергии (б) в пунктах P_1 , P_2 и P_3 по результатам моделирования. Спектры осредненных в области II зональной и меридиональной компонент скорости ветра по данным реанализа *Skiron*. Серыми вертикальными линиями показаны частоты, соответствующие суточному, полусуточному и инерционному периодом. Голубыми вертикальными линиями с цифрами отмечены пики с частотами 4,8 ч (1); 3,9 ч (2); 3,4 ч (3); 2,7 ч (4); 2,4 ч (5); 2,2 ч (6); 2,0 ч (6).

Выделяющиеся пики на спектрах уровня моря соответствуют основным приливным периодам. По сравнению с суточным, полусуточный период имеет более резкий пик, обуславливающийся вкладом от более высоких частот и колебаниями ветра, также заметно выделяющимся на частоте M_2 . Кроме них, на спектре выделяются еще три относительно низкочастотных максимума спектральной плотности: первый широкий пик с частотой инерционных колебаний с периодом 17 ч; второй спектральный пик с периодом 8,2 ч (меньшим M_2), который близок к периодам собственных колебаний сейш Черного моря, период которых находится в диапазоне 4,8 – 10 ч [16]. Третий – более высокочастотный спектральный максимум с периодом 6 ч отвечает также достаточно заметному максимуму мощности на спектре скорости приводного ветра. На более высоких частотах максимумы спектра соответствуют основным сейшевым модам Черного моря с периодами от 4,8 до 3,4 ч (отмечены на рис.4 цифрами «1» – «3») и ряду радиационных гармоник. Самые высокочастотные колебания, в пунктах P_1 и P_3 с периодами от 2,7 до 2 ч (отмечены на рис.5 цифрами «4» – «7») отвечают, по видимому, локальным сейшевым колебаниям в заливах или связаны с результатом проявления внутренних волн.

Энергетические спектры, рассмотренные для средней по объему удельной кинетической энергии, показанные на рис.5, б, демонстрируют слабое приливное влияние. Мало выраженные максимумы, отвечающие суточной и полусуточной частотам, находятся на практически равных спектральных уровнях.

Заключение. На основе анализа полей гидродинамической модели *INMOM* с высоким разрешением удалось получить физическую интерпре-

тацию условий формирования внутренних волн, наблюдаемых на спутниковых снимках в 2017 г. Использование модели циркуляции океана позволило получить общий вид эволюции колебаний жидкости в море в течение длительного промежутка времени под действием реальных атмосферных возмущений и с учетом приливного воздействия. Наблюдаемые проявления внутренних волн на поверхности моря подтверждаются положением мест генерации, вызванных приливным воздействием: в западной и центральной части Каламитского залива, у берегов Севастополя и Ялты. Анализ наблюдений двумерной пространственной структуры внутренних волн по спутниковым снимкам свидетельствует о распространении этих волн в районе от Евпатории до Севастополя параллельно береговой линии или кромке шельфа, ориентированном на восток [17], что согласуется с направлением построенных баротропных приливных течений. Спектральный анализ колебаний уровня моря позволил выявить максимумы в высокочастотной части спектра, которые соответствуют как основным сейшевым модам Черного моря с периодами 4,8; 3,4 ч, так и наличию колебаний с периодами 2,7 – 2 ч, близким к периодам наблюдаемых волн, зарегистрированных на спутниковых снимках.

Благодарности: Работа выполнена в рамках научного проекта №18-45-920036 «Характеристики внутренних волн в районе Гераклейского полуострова: проявление, моделирование, влияние на экосистему», получившего поддержку от РФФИ и г.Севастополя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kunze E.* Internal-wave-driven mixing: global geography and budgets // *J. Phys. Oceanogr.*– 2017.– 47.– P.1325-1345.
2. *Li D., Chou W.-C., Shih Y.-Y., Chen G.-Y., Chang, Y., Chow C.H., Lin T.-Y., Hung C.-C.* Elevated particulate organic carbon export flux induced by internal waves in the oligotrophic northern South China Sea // *Nature.*– 2018.– 8.– P.1-7.
3. *Vlasenko V., Stashchuk N., Palmer M.R., Inall M.E.* Generation of baroclinic tides over an isolated underwater bank // *J. Geophys. Res. Oceans.*– 2013.– 118.– P.4395-4408.
4. *Da Silva J.C.B., Buijsman M.C., Magalhaes J.M.* Internal waves on the upstream side of a large sill of the Mascarene Ridge: A comprehensive view of their generation mechanisms and evolution // *Deep Sea Res.*– 2015.– 99.– P.87-104.
5. *Sherwin T.J., Vlasenko V.I., Stashchuk N.M., Jeans D.R.G., Jones B.* Along-slope generation as an explanation for some unusually large internal tides // *Deep Sea Res.* – 2002.– 49.– P.1787-1799.
6. *Magalhaes J.M., Da Silva J.C.B.* Internal solitary waves in the Andaman Sea: new insights from SAR imagery // *Remote Sens.*– 2018.– 10(6), 861.– 16 p.
7. *Медведева А.В.* Характеристики прибрежных процессов по последовательным изображениям высокого пространственного разрешения // *Ландшафтная география в XXI веке.*– 2018.– P.494-495.
8. *Ivanov V.A., Shul'ga T.Ya., Bagaev A.V., et al.* Internal waves over the continental shelf of the Heracles Peninsula: modeling and observation // *Springer Nature Switzerland AG 2019 / Eds. V.Karev, et al.*– 2019.– P.83-92.

9. *Mityagina M.I., Lavrova O.Y., Karimova S.S.* Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea // *International Journal of Remote Sensing*.– 2010.– 31(17-18).– P.4779-4790.
10. *Zalesny V.B., Diansky N.A., Fomin V.V., Moshonkin S.N., Demyshev S.G.* Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*.– 2012.– 27(1).– P.95-111.
11. *Pacanowki R.C., Philander S.G.H.* Parameterisation of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // *J. Phys. Oceanogr.*– 1981.– 11.– P.1443-1451.
12. *Kallos G., Nickovic S., Jovic D., Kakaliagou O., Papadopoulos A., Misirlis N., Boukas L., Mimikou N., Sakellaridis G., Papageorgiou J., Anadranistakis E., Manousakis M.* The regional weather forecasting system SKIRON and its capability for forecasting dust uptake and transport // *Proc. WMO conference on dust storms*, 6 Nov. 1997. Damascus, Syria.
13. *Иванов В.А., Залесный В.Б., Лукьянова А.Н., Багаев А.В.* Приливная полусуточная гармоника в динамике Чёрного моря по результатам численного моделирования // *Докл. АН*.– 2018.– 480(1).– С.103-106.
14. *Emery W.J., Thomson R.E.* Data analysis methods in physical oceanography. 2nd edition.– Elsevier, 2001.– 612 pp.
15. *Foreman M.G.G.* Manual for tidal heights analysis and prediction.– Institution of Ocean Sciences Rep. Patricia Bay, Sidney, BC, Canada, 1977.– 101 p.
16. *Медведев И.П., Куликов Е.А.* Результаты численного моделирования поверхностных и внутренних сейшевых колебаний в Черном море // *Океанология*.– 2016.– 56(1).– С.10-17.
17. *Ivanov V.A., Shul'ga T.Ya., Bagaev A.V., Medvedeva A.V., Plastun T.V., Verzhavskaia L.V., Svishcheva I.A.* Internal waves on the black sea shelf near the Heracles Peninsula: modeling and observation // *Physical Oceanography*.– 2019.– v.26, iss.4.– P.288-304.

Материал поступил в редакцию 14.08.2019 г.
После доработки 18.10.2019 г.

V.A.Ivanov, T.Ya.Shulga, I.A.Svishcheva, R.R.Stanichnaya, A.V.Gusev

NUMERICAL ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC AND ATMOSPHERIC IMPACT FOR FORMATION OF INTERNAL WAVES NEAR THE HERACLES PENINSULA

Hydrodynamic processes in the Black Sea for 2017 was modeled using real atmospheric data from the Skiron reanalysis model. Three-dimensional nonlinear σ -model of ocean circulation INMOM was used. The output data is compared with the observations of surface internal waves recorded in the coastal zone of the Southern coast of Crimea from Landsat-8, Sentinel-2 satellites in 2017. The variability of model temperature fields and current velocities in the area, where internal waves were identified in satellite imagery, was analyzed. A spectral analysis of level fluctuations of the Black Sea and the kinetic energy of currents on the Crimean shelf was carried out. The peculiarities of the barotropic regional dynamics of the tides K_1 , M_2 , reconstructed according to model data in the region under study, are revealed.

KEYWORDS: internal waves, three-dimensional sigma-coordinate model, tidal ellipses, spectral analysis, the Crimean coast