

УДК 551.465.55

© К. Дастис¹, А. Искуердо², М. Бруно², Э. Рейес³, Е. В. Софьина^{1,4}, Н. Л. Плинк¹

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²Кадисский университет, г. Кадис, Испания

³Прибрежная система наблюдений Балеарских островов (SOCIB), Мальорка, Испания

⁴Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

sofjina_k@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НАД ЛИГУРИЙСКИМ МОРЕМ НА МЕЗОМАСШТАБНУЮ ДИНАМИКУ ВОД В ГИБРАЛТАРСКОМ ПРОЛИВЕ И МОРЕ АЛЬБОРАН

Статья поступила в редакцию 18.07.2017, после доработки 21.01.2018.

Рассмотрено влияние флуктуаций атмосферного давления на интенсивность поступления через Гибралтарский пролив поверхностных атлантических вод как фактора, определяющего особенности формирования циркуляции вод в море Альборан. Подтверждено, что на мезомасштабную динамику вод Гибралтарского пролива влияют атмосферные процессы в области значительно превышающей собственно зону Гибралтарского пролива. Показано, что Лигурийское море — район, наиболее репрезентативно отражающий связь между интенсивностью водообмена в верхнем слое Гибралтарского пролива и изменением атмосферного давления. На основе данных натурных наблюдений о скорости течения в верхнем слое Гибралтарского пролива и данных NCEP-CFSR реанализа об атмосферном давлении показано, что уменьшение атмосферного давления в Лигурийском море приводит к усилению интенсивности поступления атлантических вод, а его повышение — к уменьшению. Высказанная гипотеза о локализации воздействия атмосферного давления, влияющего на поступление атлантических вод, подтверждается результатами моделирования, полученными на основе одномерной гидродинамической модели. Основное внимание уделено анализу влияния синоптической изменчивости атмосферного давления на интенсивность поступления через Гибралтарский пролив атлантических вод, а также роли субинерциальной изменчивости водообмена в формировании мезомасштабной динамики моря Альборан. Анализ поверхностной циркуляции в море Альборан проводился с использованием данных о полях поверхностных течений, восстановленных по радарным наблюдениям, и спутниковых данных о хлорофилле.

Ключевые слова: мезомасштабная динамика вод, флуктуации атмосферного давления, субинерциальные течения, водообмен, радарные наблюдения поверхностных течений, Гибралтарский пролив, море Альборан.

C. Dastis¹, A. Izquierdo^{2,3}, M. Bruno^{2,3}, E. Reyes⁴, E. V. Sofina^{1,4}, N. L. Plink¹

¹Russian State Hydrometeorological University, St.-Petersburg, Russia

²University of Cádiz, CEIMAR, Cádiz, Spain

³Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System (SOCIB), Mallorca, Spain

⁴Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

INFLUENCE OF THE ATMOSPHERIC PRESSURE FLUCTUATIONS OVER THE MEDITERRANEAN SEA ON THE MESOSCALE WATER DYNAMICS OF THE STRAIT OF GIBRALTAR AND THE ALBORAN SEA

Received 18.07.2017, in final form 21.01.2018.

The effect of subinertial sea level atmospheric pressure fluctuations on the inflow intensity of the surface Atlantic waters through the Strait of Gibraltar and its impacts on the dynamics of the Alboran Sea is studied. The results confirm

Ссылка для цитирования: Дастис К., Искуердо А., Бруно М., Рейес Э., Софьина Е. В., Плинк Н. Л. Влияние флуктуаций атмосферного давления над Лигурийским морем на мезомасштабную динамику вод в Гибралтарском проливе и море Альборан // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 1. С. 28—39.

For citation: Dastis C., Izquierdo A., Bruno M., Reyes E., Sofina E. V., Plink N. L. Influence of the atmospheric pressure fluctuations over the Mediterranean Sea on the mesoscale water dynamics of the Strait of Gibraltar and the Alboran Sea. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 1, 28—39.

DOI: 10.7868/S2073667318010033

that the exchange flows in the Strait is affected by atmospheric processes of much larger spatial scale than the Strait of Gibraltar itself. The Ligurian Sea is the region where atmospheric pressure fluctuations correlate better with Atlantic inflow anomalies through the Strait of Gibraltar. Correlation between in situ measurements of the surface flow velocity in the Strait of Gibraltar and NCEP-CFSR reanalysis data of the atmospheric pressure for the whole Mediterranean basin shows that a decrease of atmospheric pressure in the Ligurian Sea leads to an intensification of the Atlantic water inflow, and conversely, an increase of atmospheric pressure to a decrease. The hypothesis about the remote effect of atmospheric pressure fluctuations in the Atlantic water inflow through the Strait of Gibraltar is confirmed by the results of a simulation based on a one-dimensional hydrodynamic model. The subinertial variability of the Atlantic inflow induced by atmospheric pressure fluctuations has an impact on the formation of the mesoscale dynamics of the Alboran Sea. This is confirmed by an analysis of the HF-radar surface current measurements in the Alboran Sea and satellite observations of chlorophyll-a concentration.

Key words: mesoscale dynamics, atmospheric pressure fluctuations, water exchange, subinertial current velocities, HF-radar surface current measurements, the Strait of Gibraltar, the Alboran Sea.

Прибрежная зона южной Испании (побережье Андалузии) активно используется в интересах развития различных видов морской деятельности. В зоне Гибралтарского пролива располагаются два крупных морских порта (Кадисский порт и порт г. Ахельсирас). Прибрежная акватория активно используется для рыболовства и развития аквакультурных хозяйств. Имеются значительные перспективы по использованию возобновляемых источников энергии. Наконец, ключевой задачей развития хозяйственной деятельности в прибрежной зоне побережья Андалузии является использование ее рекреационного ресурса. Развитие и функционирование этих разнообразных видов морской деятельности во многом будет зависеть от возможности получения регулярной информации о состоянии и изменчивости океанологических характеристик прибрежных вод, формирующейся под влиянием различных разномасштабных процессов. Особую роль для оперативного обеспечения морской деятельности играет прогнозирование синоптической изменчивости, определяющей изменчивость океанологических характеристик в интервале от нескольких часов до нескольких суток. Таким образом, улучшение океанологического обеспечения хозяйственной деятельности с учетом целей и задач оперативной океанологии требует рассмотрения мезомасштабных процессов, формирующих поля течений, как в самом Гибралтарском проливе, так и в сопряженных с ним областях: северо-восточной части Атлантики и западной части Средиземного моря.

Гибралтарский пролив играет важнейшую роль в формировании океанологических процессов в северо-восточной части Атлантики и западной части Средиземного моря (море Альборан). Одной из наиболее важных отличительных особенностей водообмена через Гибралтарский пролив является его преобладающая двухслойная структура. В нижнем слое происходит вынос соленых и плотных средиземноморских вод, сформировавшихся в результате смешения промежуточных и глубинных водных масс из восточной и западной частей Средиземного моря [1]. Влияние средиземноморских вод прослеживается в виде промежуточного максимума солености на горизонтах 1000—1500 м практически по всей восточной части Северной Атлантики. Условия, определяющие обмен в верхнем слое, регулируют поступление в Средиземное море более распресненной атлантической воды, которая оказывает существенное влияние на формирование океанологических полей в западной части Средиземного моря и море Альборан, что отмечено, например, в [2—5]. В результате взаимодействия океанологических и атмосферных процессов различного временного и пространственного масштаба в условиях сложного рельефа дна эта хорошо известная «классическая» схема двухслойной циркуляции может существенно модифицироваться и изменяться. Таким образом, несмотря на относительно небольшие размеры (принято считать, что длина пролива составляет порядка 60 км, а минимальная ширина — 14 км), изучение основных механизмов, определяющих динамику вод и водообмен через пролив, является «ключом» к пониманию условий формирования гидрологических, гидрохимических и биологических условий, как в самом Гибралтарском проливе, так и во всей западной части Средиземного моря. Водообмен через пролив определяется сочетанием целого ряда факторов: приливами, атмосферным давлением, воздействием ветра, разностью плотности воды в атлантическом и средиземноморском бассейнах. Эти факторы действуют совместно, но их роль и степень влияния будет различной на различных пространственных и временных масштабах.

В соответствии с [6] скорость течения в проливе Гибралтар может достигать 2.5 м/с. Баротропная субинерциальная компонента, вызванная флуктуациями атмосферного давления с периодичностью от нескольких суток до нескольких месяцев, характеризуется возникновением течений со скоростями порядка 0.4 м/с. Кроме того, непосредственное влияние ветрового напряжения создает условия для возникновения дрейфовых течений, скорость которых особенно в период штормов, может достигать значительных величин. Наличие зависящего от сезонных и многолетних изменений горизонтального градиента давления, вызванного различием плотности средиземноморской водной массы и водной массы Атлантического океана, может вызывать долгопериодные бароклинные течения со скоростями до 0.5 м/с [7]. Приливо-отливные колебания в зоне Гибралтарского пролива в основном имеют полу-суточный характер. Скорость приливо-отливных течений в сизигию может достигать 2 м/с [8]. Таким образом, водообмен через Гибралтарский пролив определяется гидродинамическими процессами различных пространственных и временных масштабов (долгопериодных, субинерциальных, приливных), имеющих сопоставимый вклад в формирование поля скоростей.

Для субинерциального временного масштаба одним из определяющих факторов является метеорологический форсинг, и в частности изменчивость атмосферного давления синоптического масштаба [9]. Впервые на взаимосвязь атмосферного давления в Средиземном море и водообмена через Гибралтарский пролив было указано в работе [10]. В 1989 г. Кандела и др. [11] в процессе численного моделирования динамики вод Гибралтарского пролива учли влияние атмосферного давления в северо-восточной части Атлантического океана и акватории Средиземного моря, получив значительное лучшее совпадение результатов расчета с данными наблюдений. В дальнейшем Ле Траон и Гаузелин [12], используя модификацию этой модели, пришли к выводу, что изменения атмосферного давления в Атлантике незначительно влияют на поступление атлантических вод и колебания уровня субинерциального масштаба в Средиземном море. Детальные результаты численного моделирования с учетом метеофорсинга представлены в работах [9, 13, 14]. В этих, как и предыдущих исследованиях, основной упор был сделан на изучение роли атмосферного давления над акваторией Средиземного моря в формировании субинерциальной изменчивости водообмена через Гибралтарский пролив. Авторы пришли к выводу, что сезонные и межгодовые колебания атмосферного давления слишком слабы, чтобы повернуть вспять поверхностный поток воды в Гибралтарском проливе. Однако, на основе анализа данных о скоростях течения [9, 15, 16], полученных в период с октября 1995 г. по май 1998 г., было показано, что при определенных условиях может наблюдаться кратковременное существенное ослабление интенсивности переноса воды в верхнем слое, которое в редких случаях может привести даже к инверсии переноса в верхнем слое. Авторы определили, что основным механизмом субинерциальной изменчивости водообмена через Гибралтарский пролив является изменение атмосферного давления в Средиземном море. Рассматривались значения атмосферного давления практически над всей акваторией Средиземного моря без учета региональных особенностей его воздействия на водообмен Гибралтарского пролива. Было также показано, что изменение характеристик поступления атлантической воды (интенсивность, направление) играет фундаментальную роль в формировании циркуляции поверхностных вод в море Альборан [17]. При этом основное внимание было уделено межсезонной изменчивости. Таким образом, целью статьи является исследование влияния флуктуаций атмосферного давления синоптического масштаба и выявление природы их влияния на мезомасштабную динамику вод в Гибралтарском проливе и море Альборан.

Основой для анализа являются данные о полях атмосферного давления в Средиземноморье, данные наблюдений скоростей течений в поверхностном слое Гибралтарского пролива, полученные в ходе эксперимента «Strait 94-96», поля поверхностных течений в море Альборан, восстановленные на основе радарных наблюдений, данные спутниковых наблюдений о концентрации хлорофилла и результаты математического моделирования.

Локальные флуктуации атмосферного давления и водообмен в Гибралтаре. Для исследования взаимосвязи изменения водообмена в Гибралтарском проливе с локальными флуктуациями атмосферного давления в Средиземноморье был выполнен корреляционный анализ между скоростью течения в поверхностном слое Гибралтарского пролива и атмосферным давлением по данным реанализа CFSR (the NCEP Climate Forecast System Reanalysis), имеющего пространственное разрешение 2.5° и часовую дискретность [18].

На рис. 1 представлена батиметрия Гибралтарского пролива и расположение реперных точек (Т1 и Т2), в которых проводились измерения течений с помощью ADCP (точка Т1) и измерителя течений Aanderaa RCM9 (точка Т2) в период с октября 1994 до октября 1996 г. в ходе натурального эксперимента «Strait 94-96» [19]. В точке Т1 для исследования течений в поверхностном слое использовались данные на глубине 45 м. В соответствии с работой [20], глубина залегания границы между поверхностным и придонным слоями в районе Камаринальского порога варьируется в пределах 75—140 м (точка Т1), уменьшаясь в восточном и северном направлениях. Полученные оценки глубины залегания границы раздела верхнего и нижнего слоев и ее изменчивости также подтверждаются результатами трехмерного моделирования [21]. В точке Т2 поверхность раздела двух слоев располагается выше, измеритель течений был установлен на глубине 30 м. Таким образом, используемые данные о течениях в реперных точках характеризуют водообмен в поверхностном слое Гибралтарского пролива, причем заглублиение горизонта наблюдений позволяет уменьшить вклад локальных дрейфовых течений.

Согласно работе [11], отклик океана на частотах ниже инерционной, приводит к формированию в Гибралтарском проливе баротропного течения, которое обычно относят к субинерциальным движениям. Этот низкочастотный сигнал должен исключать компоненты приливной волны. Несмотря на то, что основная приливная изменчивость объясняется полусуточными и суточными компонентами, исключение только их приводит к сохранению приливной изменчивости, обусловленной взаимодействием основных составляющих прилива со сложной морфометрией и мелководьем. Чтобы избежать этого, согласно [22] предлагается для выделения субинерциального потока в данных о скоростях течений отфильтровать гармоники с периодом менее 33 ч. Такой подход активно использовался в работах по изучению субинерциальных колебаний в Гибралтарском проливе целого ряда авторов, например [11]. В данной работе для выделения субинерциального потока скорости течений были отфильтрованы с помощью быстрого преобразования Фурье, с аналогичными параметрами.

На рис. 2, а представлено положение точек, в которых значения атмосферного давления использовались для корреляционного анализа. Коэффициент корреляции представлен на рис. 2, б. Аномалии продольной составляющей скорости течения в проливе (точка Т1) наиболее хорошо коррелирует с флуктуациями атмосферного давления в точке, расположенной в северной части Лигурийского моря (северо-западная часть Средиземного моря), которая и была в дальнейшем использована как опорная точка для оценки воздействия локальных флуктуаций атмосферного давления на динамику вод в Гибралтарском проливе. Коэффициент корреляции для опорной точки составил — 0.55.

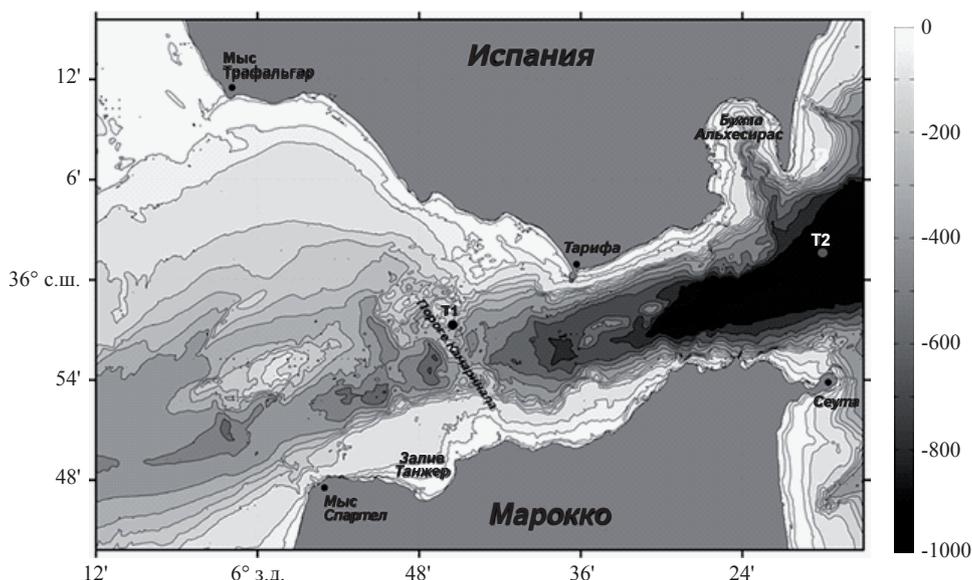


Рис. 1. Батиметрия Гибралтарского пролива (в м).

Т1 и Т2 — положение реперных точек, в которых проводились наблюдения над течениями поверхностного слоя с помощью акустического доплеровского профилометра (ADCP) и измерителя течений Aanderaa RCM9, соответственно.

Fig. 1. The Bathymetry of the Strait of Gibraltar (meters).
The locations where current velocity was measured by ADCP (T1) and by Aanderaa RCM9 (T2).

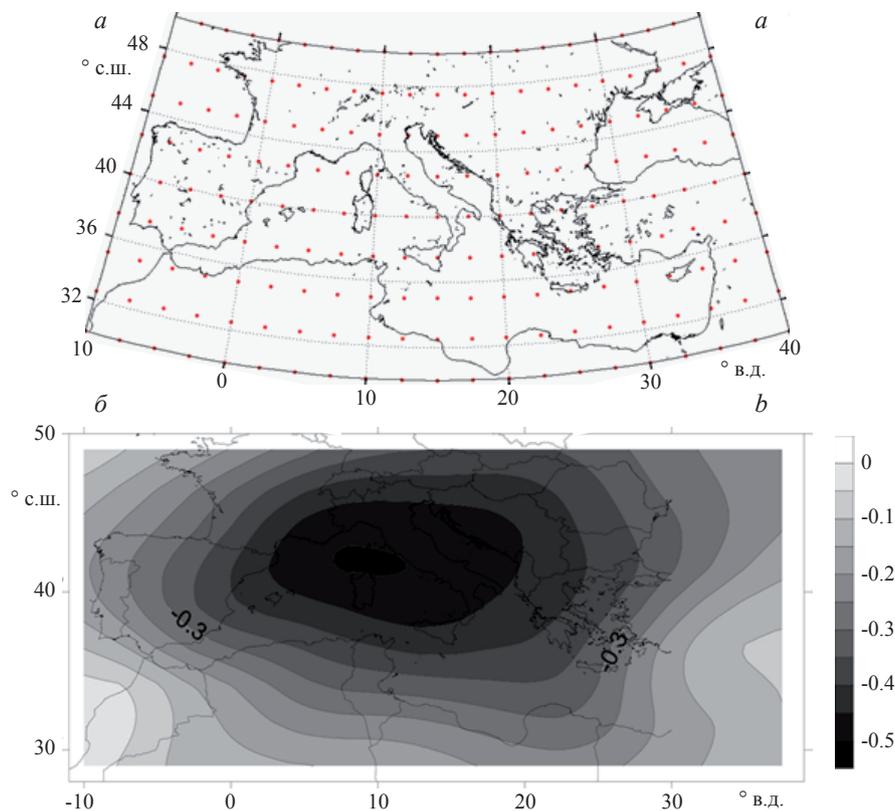


Рис. 2. Корреляция флуктуаций поля атмосферного давления в Средиземноморье и продольной составляющей скорости течения поверхностного слоя в Гибралтарском проливе (точка T1). На фрагменте (а) отмечено положение точек, для которых были сформированы ряды значений атмосферного давления; на фрагменте (б) — поле значений коэффициента корреляции.

Fig. 2. Correlation between atmospheric pressure fluctuations over the Mediterranean Sea and the along-strait current velocity component of the upper layer in the Strait of Gibraltar at T1. (a) the atmospheric pressure data grid; (b) the correlation coefficient field.

Известно, что Генуэзский залив, расположенный на севере Лигурийского моря, характеризуется высокой циклонической активностью. Согласно [23] через эту зону ежегодно проходят траектории порядка 45 циклонов, причем в среднем около 15 циклонов образуются непосредственно в северной части Лигурийского моря. Наибольшая по сравнению с другими районами Средиземного моря изменчивость атмосферного давления в северной части Лигурийского моря подтверждается результатами разложения на ортогональные составляющие среднегодового поля атмосферного давления [11]. Циклоническая активность в Генуэзском заливе наблюдается в течение всего года, однако наибольшую активность она имеет в зимний период, и является одним из основных факторов, определяющих погодные условия во всем Средиземноморье [24].

Поскольку выявленная область эффективного влияния атмосферного давления на динамику верхнего слоя Гибралтарского пролива превышает порядок баротропного радиуса деформации Россби (порядка 2000 км), доля кинетической энергии в отклике водной массы на возмущение атмосферного давления будет превышать долю потенциальной энергии, что соответствует свойствам, так называемой, длинной волны Пуанкаре [25]. Таким образом, изменение атмосферного давления в западной части Средиземного моря должно привести к формированию низкочастотного сигнала в виде заметных колебаний скорости баротропных течений и слабо проявиться в изменении поля уровня. Для течений меньшего временного масштаба, прежде всего приливных, возникающие субинерциальные течения можно рассматривать как фоновые. Изменение фонового динамического режима приведет к изменению локальных скоростей суммарного течения, что с учетом бароклинного взаимодействия приливов с особенностями рельефа дна будет влиять на мезомасштабную структуру вод Гибралтарского пролива.

Для подтверждения влияния флуктуаций атмосферного давления в ограниченной области Средиземного моря на водообмен в Гибралтарском проливе рассмотрим совмещенные по времени графики аномалий атмосферного давления в опорной точке и отклонений продольной составляющей скорости субинерциального течения в двух реперных точках, расположенных в зоне Гибралтарского пролива (рис. 3). Из совмещенных графиков видно, что понижение атмосферного давления в зоне Лигурийского моря соответствует появлению положительной аномалии продольной составляющей скорости, т. е. усилению потока распресненной атлантической воды, поступающей через Гибралтарский пролив в Средиземное море. Наоборот, повышение атмосферного давления в Лигурийском море приводит к увеличению отрицательной аномалии продольной составляющей скорости, т. е. ослаблению потока, хотя этот процесс выражен менее заметно (рис. 3). Моменты интенсивного понижения атмосферного давления в опорной точке, а также моменты наблюдавшегося по данным измерений усиления скорости течений в верхнем слое Гибралтарского пролива для наглядности отмечены на графиках цифрами. Как видно, периоды усиления продольной составляющей скорости субинерциального течения в Гибралтарском проливе, приводящего к усилению поступления через пролив поверхностных атлантических вод хорошо совпадают с периодами понижения давления в Лигурийском море. Характерный временной масштаб изменения интенсивности поступления атлантической воды через Гибралтарский пролив составляет несколько суток.

Кросс-спектральный анализ взаимосвязи колебаний атмосферного давления и продольных составляющих скорости субинерциального течения в точке T1, показал, что максимальные значения спектральной плотности обоих рядов приходятся на колебания с периодом 6 сут (рис. 4, *a*). Максимальные значения функции когерентности, превышающие 95 % доверительный интервал, также соответствуют данному периоду (рис. 4, *b*), что указывает на взаимосвязь рассматриваемых процессов. Однако в обоих случаях пики полученных функций «размазаны» по достаточно широкому диапазону частот, что говорит о значительной стохастичности мезомасштабных процессов. Таким образом, запаздывание

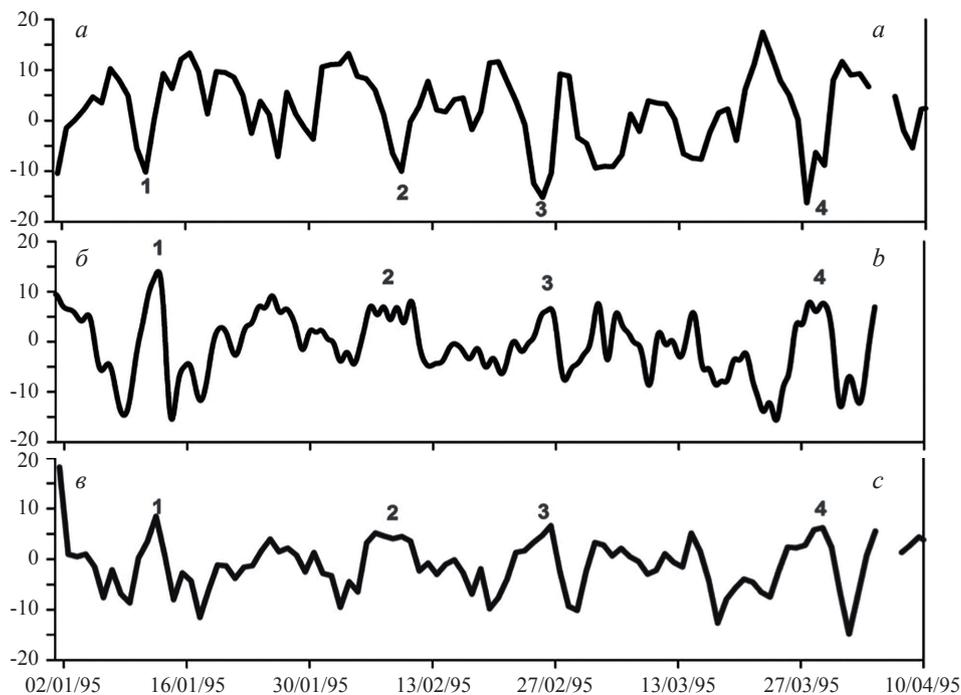


Рис. 3. Совмещенные по времени графики аномалий атмосферного давления (мб) в опорной точке в Лигурийском море (*a*) и отклонений продольной составляющей скорости субинерциального течения (см/с) в двух реперных точках T1 (*b*) и T2 (*c*), расположенных в зоне Гибралтарского пролива.

Характерные моменты понижения атмосферного давления и усиления скорости течения отмечены цифрами 1—4.

Fig. 3. Time series of atmospheric pressure anomaly (mb) at the reference point in the Ligurian Sea (*a*) and the anomaly of the along-strait component of the subinertial current velocity (cm/s) at the Strait of Gibraltar at T1 (*b*) and T2 (*c*). Events of concurrent decreasing atmospheric pressure and increasing the current velocity are indicated by the numbers 1—4.

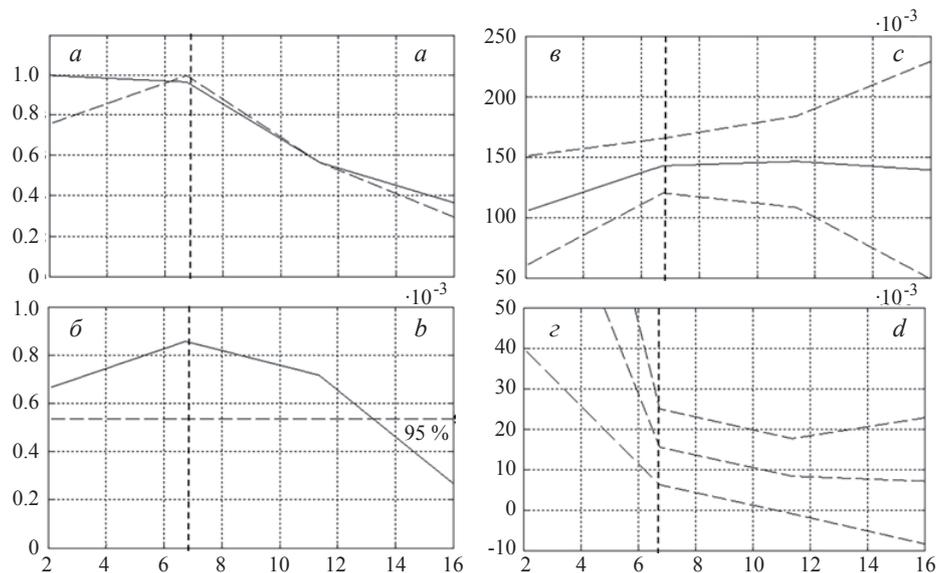


Рис. 4. Результаты кросс-спектрального анализа между колебаниями атмосферного давления в опорной точке в Лигурийском море и продольной составляющей скорости субинерциального течения в реперной точке Т1. По оси абсцисс отложена частота в циклах в час, (а) спектр нормированных амплитуд давления (сплошная кривая) и скорости течения (прерывистая кривая); (б) диаграмма когерентности (сплошная кривая), 95 % доверительный интервал (прерывистая линия); (в) сдвиг фаз (в градусах) и (г) сдвиг фаз (в часах) между колебаниями давления и скорости течения с доверительными интервалами.

Fig. 4. Results from cross-spectral analysis between atmospheric pressure at the reference point in the Ligurian Sea and the along-strait component of the subinertial current velocity at T1 in the Strait of Gibraltar. The abscissa is the frequency in cycles per hour, (a) normalized amplitude spectra for the atmospheric pressure (solid line) and the subinertial current (dashed line); (b) coherence diagram from the cross-spectral analysis between atmospheric pressure and subinertial current, horizontal dashed line indicates the 95 % significant level; (c) the same as in (b) but for phase-lag and (d) time lags of current velocity leading atmospheric pressure variations at the reference point in the Ligurian Sea with the corresponding confidence interval.

колебаний продольной составляющей скорости относительно колебаний атмосферного давления в Лигурийском море, с учетом доверительных интервалов составляет 14 ± 10 ч (рис. 4, г).

Такой незначительный сдвиг по времени позволяет предположить, что статическое повышение уровня воды в западной части Средиземного моря, обусловленное понижением атмосферного давления, действует как «насос», приводя к дополнительному «высасыванию» воды через Гибралтарский пролив и усилению, таким образом, притока атлантической воды. В случае повышения давления возникающее бароградиентное течение имеет противоположный знак и препятствует проникновению атлантической воды. Исходя из общих соображений такая реакция водной системы на изменение внешнего воздействия атмосферного давления должна иметь длинноволновый характер.

Одномерная баротропная модель канала с переменным сечением. Для подтверждения выявленных закономерностей циркуляции был выполнен оценочный расчет скоростей течений в Гибралтарском проливе с использованием одномерной баротропной модели канала с переменным сечением (рис. 5). Уравнение движения для одномерной свободной длинной волны было дополнено в качестве внешней силы слагаемым, связанным с градиентом атмосферного давления. На левой границе канала, которая принималась «жидкой», задавалось условие излучения, соответствующее свободному прохождению волны без отражения. Правая граница канала считалась твердой, на ней задавалось условие не протекания. Очаг флуктуаций атмосферного давления принимался стационарным. Положение центра очага атмосферного давления и изменение давления во времени графически представлены на рис. 6. Амплитуда в центре очага возмущения атмосферного давления задавались с учетом реальных данных, приведенных на рис. 3.

Как показал выполненный расчет, аномалия давления в районе Лигурийского моря с амплитудой 10 мб формирует бароградиентную составляющую течения в проливе Гибралтар с амплитудным значением скорости течения порядка 0.2 м/с (рис. 7), что не противоречит данным наблюдений,

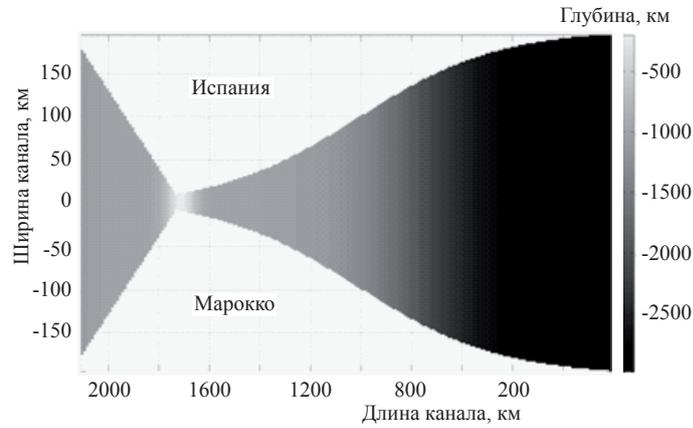


Рис. 5. Геометрические параметры модельного одномерного канала с переменной площадью поперечного сечения.

Fig. 5. Geometry of the channel with variable section.

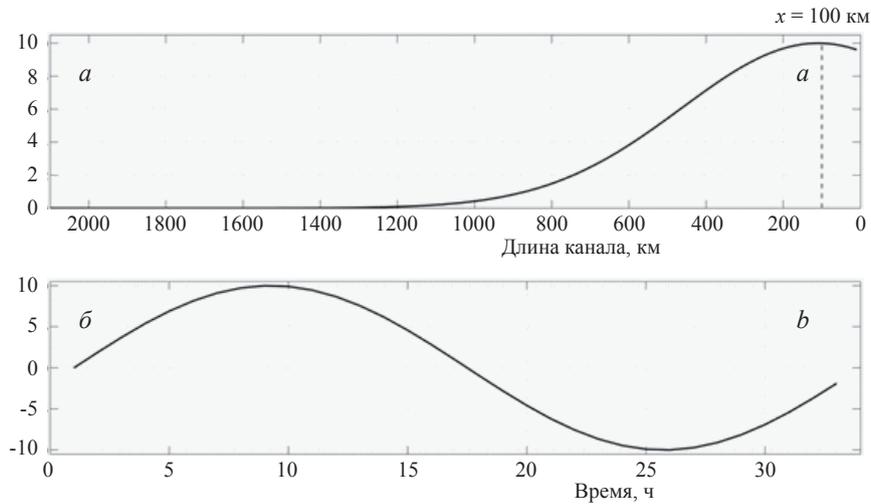


Рис. 6. Пространственная форма волны давления (мб) в канале (а) и изменение давления (мб) во времени в точке x , расположенной в 100 км от твердой границы (б).

Fig. 6. Atmospheric pressure (mb) spatial variation in the channel (a) and time variation (b) at point x located 100 km from the solid boundary.

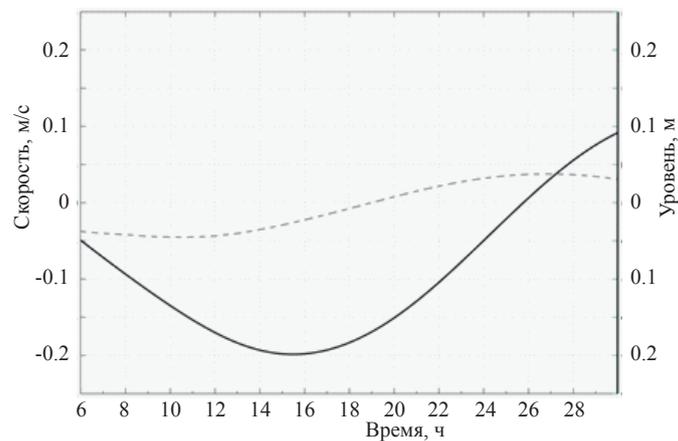


Рис. 7. Изменения скорости течения (сплошная) и уровня моря (пунктир) в Гибралтарском проливе, вызванные колебаниями давления в Лигурийском море по результатам одномерной модели.

Fig. 7. Current velocity (solid line) and sea level (dashed line) evolutions in the Strait of Gibraltar by modeling results.

представленных на рис. 3. Поскольку сдвиг по фазе между изменением уровня и скорости близок к 90° , можно предположить, что формирующиеся длинноволновые колебания имеют характер стоячей волны. Последнее объясняется тем, что, несмотря на задание условия свободного излучения на западной границе расчетной области, резкое сужение канала в зоне Гибралтарского пролива создает условия для практически полного отражения длинной волны на входе в пролив.

Сдвиг по фазе между моментом наступления минимума скорости потока атлантической воды в зоне Гибралтарского пролива и максимума атмосферного давления в Лигурийском море составляет порядка 6 ч. Что сопоставимо с результатами представленного выше кросс-спектрального анализа, при условии, что численный расчет носит оценочный характер, интенсивность поверхностного потока определяется только изменением атмосферного давления, а при кросс-спектральном анализе, используются фактические данные наблюдений над продольной составляющей скорости течения, из которых невозможно полностью исключить дрейфовую составляющую. Кроме того, локальные ветра вдоль пролива часто коррелируют с изменениями атмосферного давления в западном Средиземноморье [26], поэтому очень сложно разделить вклад различных факторов в изменчивость субинерциальных скоростей по данным наблюдений.

Таким образом, полученные на основе численного расчета оценки перепада атмосферного давления и соответствующие ему скорости баротропного течения, сопоставимые по значениям с натурными данными, качественно подтверждают наличие взаимосвязи между флуктуациями атмосферного давления в Лигурийском море и интенсивностью поступления атлантической воды в западную часть Средиземного моря.

Повышение атмосферного давления в Лигурийском море способно сформировать в зоне Гибралтарского пролива достаточно интенсивное бароградиентное течение, направленное в сторону Атлантического океана. Образовавшееся бароградиентное течение будет препятствовать притоку атлантической воды в Средиземное море и приводить к подъему границы раздела между придонным и поверхностным слоем [9]. Понижение атмосферного давления, наоборот, будет приводить к формированию баротропного течения, направленного в сторону Средиземного моря, вызывая усиление поступления распресненной воды из Атлантики и заглужение границы раздела между поверхностным и глубинным слоями.

Приток атлантических вод через Гибралтар и мезомасштабная динамика моря Альборан.

Изменение знака бароградиентного течения приводит не только к усилению или ослаблению поступления атлантической воды в верхнем слое Гибралтарского пролива, но и к изменению общего характера циркуляции в море Альборан, которая определяется свойствами потока атлантических вод [17, 27]. Циркуляция в море Альборан подвержена масштабам изменчивости потока атлантических вод от приливного до субинерциального, сезонного и межгодового, при этом она осциллирует главным образом между двумя квазистационарными состояниями. Первое характеризуется наличием двух антициклонических мезомасштабных вихрей (западным и восточным), наблюдается в 48 % случаев, второе состояние — наличием только одного антициклонического вихря (24 % случаев) [28]. В работе [27] на основе анализа полей распределения солёности качественно рассмотрена эволюция системы поверхностных течений в море Альборан в результате взаимодействия западного антициклонического вихря (Western Alboran Gyre, WAG) с выходящей из Гибралтарского пролива струей атлантической воды. Согласно [27, 29] направление течения на выходе из Гибралтарского пролива в море Альборан в среднем северо-восточное, ослабление скорости течения соответствует смещению направления течения на север, что интерпретировалось как ослабление или миграция WAG под действием локальных метеорологических условий. В [26] на основе данных наблюдений, включая снимки спутникового зондирования, смещение струи атлантических вод в южном направлении ассоциируется с понижением скорости притока атлантических вод. Смещение струи на север в периоды ослабления притока атлантических вод были задокументированы в [29, 30].

Ясно, что циркуляционная система очень сложная и однозначного соответствия между скоростью притока атлантических вод и системой течений в море Альборан, по-видимому, нет. С другой стороны из [28] следует, что максимальные скорости преимущественно имеют северо-восточное направление, в то время как южные направления сопровождаются понижением скорости притока атлантических вод. К подобным выводам пришли авторы работы [31], результаты численных экспериментов показали,

что при ослаблении притока струя атлантических вод реже отклоняется на север и чаще в южном направлении.

Рассмотрим две синоптические ситуации, соответствующие локальному понижению (рис. 8, *а*, см. вклейку) и повышению (рис. 8, *б*) атмосферного давления в Генуэзском заливе Лигурийского моря. Согласно высказанной в начале статьи гипотезе, в первом случае будет наблюдаться усиление, а во втором — ослабление притока поверхностных атлантических вод через Гибралтарский пролив, обусловленные синоптической изменчивостью атмосферного давления в Лигурийском море.

На рис. 9 (см. вклейку) представлены поля скоростей поверхностных течений, полученных в Университете Кадиса (Испания) на основе обработки радарных данных. Измерения были выполнены с использованием системы дальнего ВЧ радара «SeaSonde CODAR» (Coastal Ocean Dynamics Applications Radar), которая развернута в проливе Гибралтар в рамках проекта TRADE. Эта система оснащена тремя антеннами, расположенными на маяках Сеута, Пунта Карнэро и Тарифа, работающими на частоте 26.8 МГц и полосой пропускания 150 кГц. Поле измерения имеет пространственное разрешение 1 км в радиальном направлении и угловое разрешение, равное 5° [32]. Первичные данные, полученные на каждой радиолокационной станции, были проинтерполированы в узлы регулярной сетки с пространственным разрешением в 1 км с осреднением по времени в один час, что позволяет получать информацию о пространственном распределении поверхностных течений в зоне выхода из Гибралтарского пролива практически в реальном времени.

Восстановленные по радарным данным поля поверхностных течений совпадают с рассматриваемой общей структурой циркуляции и качественно подтверждают ее связь с интенсивностью поступления через Гибралтарский пролив атлантической водной массы. Направление течений на северо-восток отвечает усилению потока атлантических вод через Гибралтарский пролив (рис. 9, *а*), в случае ослабления притока, струя атлантических вод отклоняется к югу, WAG становится слабее или мигрирует в восточном направлении.

В дополнение рассмотрим спутниковые данные о концентрации хлорофилла в западной части Средиземного моря, полученные со спутника «MODIS aqua» и совпадающие по времени с фиксацией полей скорости поверхностных течений (рис. 10, см. вклейку).

Распределение концентрации хлорофилла может быть использовано для визуализации вихревых структур в поверхностном поле течений, характеризующихся формированием зон относительно повышенной или пониженной концентрации хлорофилла. Учитывая низкую концентрацию хлорофилла во входящем потоке, мы видим две типичные ситуации, которые наблюдаются в западной части Средиземного моря, в зоне выхода атлантических вод из Гибралтарского пролива. Из представленных изображений видно, что 23 апреля 2012 г. (рис. 10, *а*), приходящегося на момент понижения атмосферного давления в Лигурийском море и увеличения затока атлантической водной массы, в западной части моря Альборан наблюдаются значения концентрации, превышающие концентрацию хлорофилла в поступающей через Гибралтарский пролив атлантической водной массе, что говорит о локальном характере формирования поля хлорофилла и расширении зоны антициклонической циркуляции (WAG).

Распределение концентрации хлорофилла, соответствующее моменту повышения атмосферного давления в Лигурийском море и ослабления поступления поверхностных атлантических вод (18 мая 2012 г.), показано на рис. 10, *б*. В отличие от предыдущего случая, ситуация в период ослабления поступления поверхностных атлантических вод характеризуется ослаблением антициклонического вихря или его миграции на восток и созданием условий для формирования циклонической завихренности у побережья Испании, о чем свидетельствует расширение здесь пятна с повышенной концентрацией хлорофилла. В свою очередь уменьшение концентрации хлорофилла в центральной и южной части моря Альборан объясняется отклонением основной струи атлантических вод с низкой концентрацией хлорофилла к югу.

Представленные результаты подтверждают влияние атмосферных процессов в области значительно превышающей собственно зону Гибралтарского пролива на водообмен в проливе. Собственно, выявлена связь между интенсивностью поступления распресненных атлантических вод через Гибралтар с флуктуациями атмосферного давления синоптического периода в ограниченной области Средиземноморья, а именно в Лигурийском море. Положительная аномалия атмосферного давления приводит к ослаблению

субинерциальных течений в поверхностном слое в Гибралтарском проливе, а отрицательная вызывает усиление притока атлантических вод.

Результаты моделирования, полученные на основе одномерной баротропной модели канала с переменным сечением, подтверждают выводы, основанные на натурных данных, о том, что значительная часть субинерциальной изменчивости водообмена через Гибралтарский пролив связана с удаленным атмосферным форсингом в Лигурийском море.

Показана возможность построения по данным радиолокационных наблюдений поля поверхностных скоростей течений в режиме близком реальному времени, что в перспективе даёт хорошую возможность для сопоставления результатов расчёта с данными наблюдений, и делает данный алгоритм эффективным инструментом при ассимиляции данных наблюдений в оперативных океанографических системах.

На основе радарных данных о полях скоростей течений и спутниковых данных о концентрации хлорофилла проанализирована эволюция поверхностной циркуляции в море Альборан при увеличении и ослаблении поступления распресненной атлантической воды через Гибралтарский пролив.

В результате субинерциальной изменчивости, обусловленной синоптической изменчивостью атмосферного давления над Лигурийским морем, в случае усиления притока через Гибралтарский пролив в Средиземное море струя атлантических вод «прижимаясь» к берегу препятствует формированию циклонического круговорота у испанского побережья. В случае ослабления струя атлантической воды отклоняется к югу, создавая условия для формирования циклонической завихренности у побережья Испании.

Данные результаты были получены на основе анализа единичных синоптических ситуаций и требуют дальнейшего изучения на основе статистического анализа данных наблюдений и численного моделирования, что будет являться задачей будущих исследований.

Архив данных 20th Century Reanalysis Project version 2c предоставляется офисом климатологической программы Национального управления по исследованиям океанов и атмосферы (США) и офисом биологических и экологических научных исследований Департамента Энергии (США).

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0014) при частичной поддержке Erasmus Mundus A2 S1-L04 (2012-2734/001-001-EMA2), проектов MEGAN (CTM2013-49048-C2-2-R) и OCASO (223_OCASO_5_E).

Литература

1. Millot C. Another description of the Mediterranean Sea outflow // Progress in Oceanography. 2009. V. 82, № 2. P. 101—124.
2. Lacombe H., Richez C. The regime of the Strait of Gibraltar // Elsevier Oceanography Series. 1982. V. 34. P. 13—73.
3. Farmer D. M., Armi L. The flow of Atlantic water through the Strait of Gibraltar // Progress in Oceanography. 1988. V. 21. P. 1—105.
4. Bryden H. L., Kinder T. H. Steady two-layer exchange through the Strait of Gibraltar // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. 1991. V. 38. P. S445—S463.
5. Tsimplis M. N., Bryden H. L. Estimation of the transports through the Strait of Gibraltar // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2000. V. 47, № 12. P. 2219—2242.
6. Bruno M., Chioua J., Romero J. et al. The importance of sub-mesoscale processes for the exchange of properties through the strait of Gibraltar // Progress in Oceanography. 2013. V. 116. P. 66—79.
7. Bryden H. L., Candela J., Kinder T. H. Exchange through the Strait of Gibraltar // Progress in Oceanography. 1994. V. 33, N 3. P. 201—248.
8. Tsimplis M. N. Vertical of tidal currents over the Camarinal Sill at the Strait of Gibraltar // Journal of Geophysical Research, 2000. V. 105, N. C8. P. 19709—19728.
9. Garcia Lafuente J., Alvarez Fanjul E., Vargas J. M., Ratsimandresy A. W. Subinertial variability in the flow through the Strait of Gibraltar // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2002. V. 107, N C10. 3168, doi:10.1029/2001JC001104.
10. Crepon M. Influence of atmospheric pressure on the mean level of the western mediterranean and on the transport through the Strait of Gibraltar // Cah. Oceanogr. 1965. V. 1. P. 15—32.
11. Candela J., Winant C., Bryden H. Meteorologically forced subinertial flows through the Strait of Gibraltar // Journal of Geophysical Research. 1989. V. 94. P. 12667—12679.
12. Le Traon P.-Y., Gauzelin P. Response of the mediterranean mean sea level to atmospheric pressure forcing // Journal of Geophysical Research. 1997. V. 102, N C1. P. 973—984.
13. Garcia Lafuente J., Vargas J. M., Plaza F. et al. Tide at the eastern section of the Strait of Gibraltar // Journal of Geophysical Research. 2000. V. 105. N C6. P. 14197—14213.
14. Garcia Lafuente J., Delgado J. The meandering path of a drifter around the western alboran gyre // Journal of Physical Oceanography. 2004. V. 34, N 3. P. 685—692.

15. *Garcia Lafuente J., Delgado J., Criado F.* Inflow interruption by meteorological forcing in the Strait of Gibraltar // *Geophysical Research Letters*. 2002. V. 29, N 19. 1914, doi:10.1029/2002GL015446
16. *Garcia Lafuente J., Delgado J., Vargas J. M.* et al. Low-frequency variability of the exchanged flows through the Strait of Gibraltar during canigo // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2002. V. 49, N 19. P. 4051—4067.
17. *Speich S., Madec G., Crepon M.* A strait outflow circulation process study: the case of the Alboran Sea // *Journal of physical oceanography*. 1996. V. 26, N 3. P. 320—340.
18. *Saha S., Moorthi S., Pan H-L.* et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2010. V. 91. P. 1015—1057, doi: 10.1175/2010BAMS3001.1.
19. *Vázquez Á.* Ondas internas en el estrecho de Gibraltar y procesos de mezcla inducidos. PhD Thesis, University of Cádiz, 2006, 282 p. (in Spain).
20. *Bray N. A., Winant C. D., Kinder T. H., Candela J.* Generation and kinematics of the internal tide in the Strait of Gibraltar. Pratt L.J. (ed.) // *The physical oceanography of sea straits*. Kluwer Academic, Boston. 1990. P. 477—491.
21. *Sannino G., Carillo AArtale V.* Three-layer view of transports and hydraulics in the strait of gibraltar: A three-dimensional model study // *Journal of Geophysical Research*. 2007. V. 112, N C03010, doi:10.1029/2006JC003717.
22. *Flagg C. N., Vermersch J. A., Beardsley R. C.* New England shelf dynamics experiment (March 1974) data report, II, The moored array, Rep. 76-1, Dept. of Meteorol. Mass. Inst. of Technol., Cambridge, 1976.
23. *Ulbrich U., Lionello P., Belušić D.* et al. Climate of the Mediterranean: synoptic patterns, temperature, precipitation, winds, and their extremes, in *The Climate of the Mediterranean Region — From the Past to the Future*. P. Lionello (Ed.), Amsterdam, Elsevier, 2012, 301—346.
24. *Radinovic D.* Mediterranean cyclones and their influence on the weather and climate, program on short and medium range weather prediction research. WMO, PSMP Report Ser. N 24. Geneva, Switzerland, 1987, 131 p.
25. *Гилл А.* Динамика атмосферы и океаны. Т. 1. М.: Мир, 1986. 415 с.
26. *Macías D., Bruno M., Echevarría F., Vázquez A., García C. M.* Meteorologically-induced mesoscale variability of the North-western Alboran Sea (southern Spain) and related biological patterns // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2008. V. 78. P. 250—266.
27. *Víúdez A., Pinot J. M., Haney R. L.* On the upper layer circulation in the Alboran Sea // *Journal of Geophysical Research*. 1998. V. 103. № C10. P. 21653—21666.
28. *Peliz A., Boutov D., Teles-Machado A.* The Alboran Sea mesoscale in a long term high resolution simulation: statistical analysis // *Ocean Model*. 2013. V. 72. P.32—52.
29. *Perkins H., Kinder T., La Violette P. E.* The atlantic inflow in the western Alboran Sea // *J. Phys. Oceanogr.* 1990. V. 20. P. 242—263.
30. *García-Lafuente J., Cano N., Vargas M., Rubin JP., Hernandez-Guerra A.* Evolution of the Alboran Sea hydrographic structures during July 1993 // *Deep Sea Res. I*. 1998. V. 45. P. 39—65.
31. *Macías D., García-Gorriz E., Stips A.* The seasonal cycle of Atlantic Jet dynamics in the Alboran Sea: direct atmospheric forcing versus Mediterranean thermohaline circulation // *Ocean Dynamics*. 2016. V. 66. P. 137—151.
32. *Lorente P., Soto-Navarro J., Alvarez Fanjul E., Piedracoba S.* Accuracy assessment of high frequency radar current measurements in the Strait of Gibraltar // *Journal of Operational Oceanography*. 2014. V. 7, N 2. P. 59—73.

К статье *Дастис К. и др. Влияние флуктуаций...*

Dastis C. et al. Influence of the atmospheric pressure fluctuations...

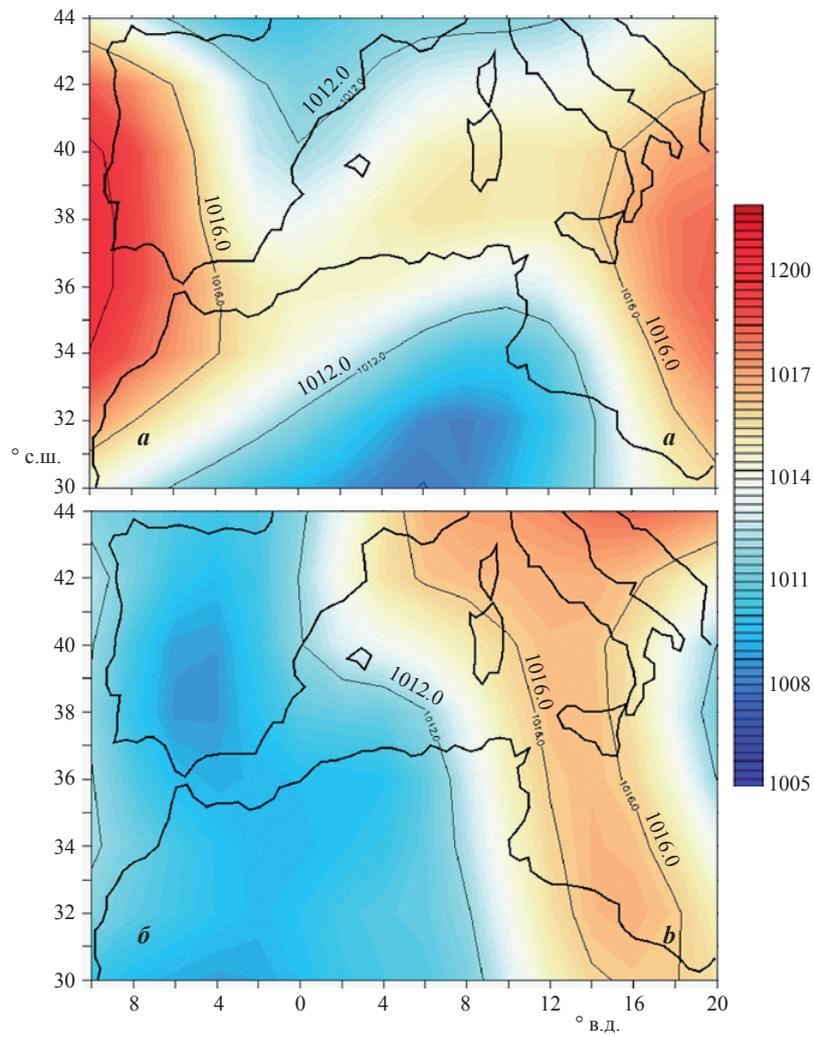


Рис. 8. Поля среднесуточного атмосферного давления (в гПа) по данным реанализа NOAA-CIRES 20thC V2c 23.04.2012 г. (а) и 18.05.2012 г. (б).

Fig. 8. Sea level atmospheric pressure (hPa) on 23.04.2012 (a) and 18.05.2012 (b) from reanalysis data NOAA-CIRES 20thC V2c.

К статье *Дастис К. и др.* Влияние флуктуаций...

Dastis C. et al. Influence of the atmospheric pressure fluctuations...

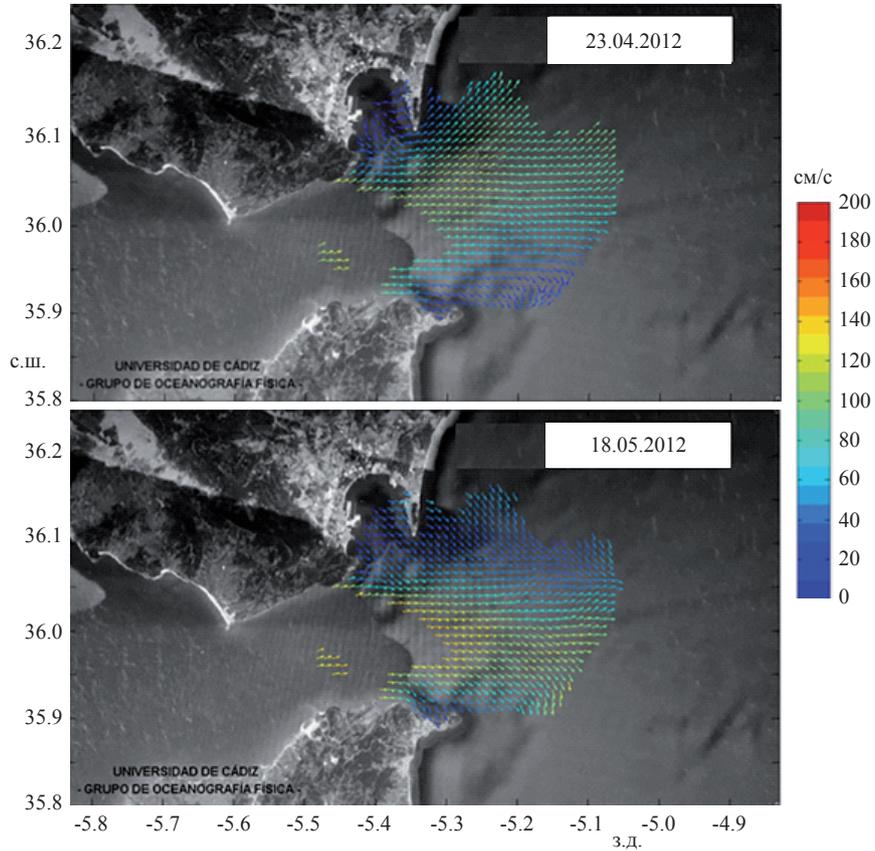


Рис. 9. Поля поверхностных течений, восстановленные на основе радарных наблюдений, приходящиеся на те же дни, что и в рис. 8.

Fig. 9. Reconstructed fields of surface current velocity from HF radar measurements corresponding to the same days as in fig. 8.

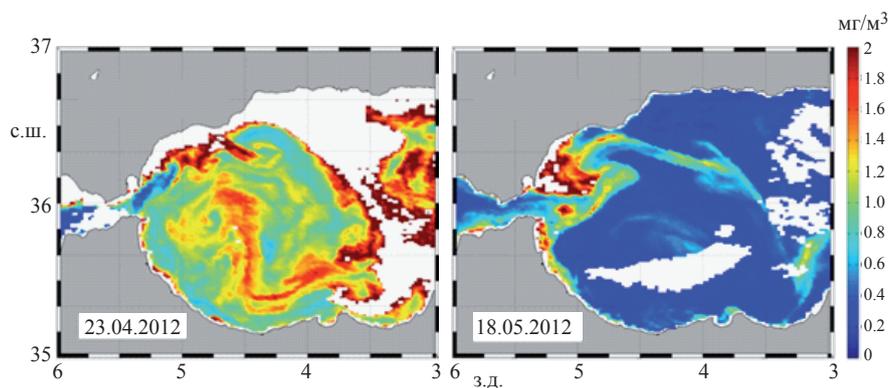


Рис. 10. Спутниковые изображения MODIS концентрации хлорофилла в море Альборан, приходящиеся на те же дни, что и в рис. 8.

Fig. 10. MODIS satellite images of Chlorophylla-a concentration in the Alboran Sea corresponding to the same days as in fig. 8.