

УДК 912:532.5

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЙ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ОБЛАСТЕЙ ПОВЫШЕННОГО АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ<sup>1</sup>

© 2021 г. Т. Я. Шульга<sup>а, \*</sup>, А. Е. Щодро<sup>б</sup>, А. В. Холощев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>ФИЦ “Морской гидрофизический институт РАН”,  
Севастополь, 299011 Россия

<sup>б</sup>Севастопольское отделение “Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова”,  
Севастополь, 299011 Россия

\*e-mail: shulgaty@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2019 г.

После доработки 04.12.2020 г.

Принята к публикации 10.12.2020 г.

С использованием трехмерной гидродинамической модели общей циркуляции океана Princeton Ocean Model и гидравлических методов расчета оценена скорость течений из Азовского моря в Черное, возникающих при перемещении областей повышенного атмосферного давления с северных румбов. Анализ скорости течений на различных створах Керченского пролива выполнен для метеорологических ситуаций с наибольшим повышением атмосферного давления за период 1948–2017 гг. по данным реанализа NCEP/NCAR. Определены возможные увеличения скорости течений, связанных с местным углублением русла у опор моста и со сжатием струй перед створом о. Тузла. С учетом доступных гидрометеорологических данных сделан вывод о повторяемости случаев повышения атмосферного давления над Азово-Черноморским регионом в современном периоде – 2005–2017 гг.

**Ключевые слова:** Азовское море, Керченский пролив, гидродинамическое моделирование, волна прорыва, антициклоны, тенденции повторяемости.

**DOI:** 10.31857/S0321059621030135

### ВВЕДЕНИЕ

Увеличение скорости течения в узких проливах представляет существенную опасность для судоходства и эксплуатации гидротехнических сооружений. Информация о возможных изменениях скорости течений – определяющий фактор при планировании и проектировании объектов морской инфраструктуры в проливах и на примыкающих к ним территориях. Практический интерес представляет исследование рисков возникновения опасных ситуаций в районе Керченского пролива, где через наиболее узкую его часть на створе о. Тузла завершено строительство автомобильно-железнодорожного моста, соединяющего Крым с материковыми регионами России. В этом районе возросшая интенсивность судоходства и гидротехнического строительства обуславливает необходимость прогнозирования последствий атмосферных воздействий, возникающих здесь с высокой повторяемостью.

Скачкообразное повышение атмосферного давления над акваторией водного объекта, вызванное перемещением над ней антициклонов, – причина возникновения в нем длинной (анемобарической) волны. Перемещение антициклонов по направлению от северного входа в Керченский пролив к Черному морю вызывает нагонное повышение уровня, а также изменение направления и скорости течений [12, 34]. Эти изменения в движении жидкости, зависящие также от рельефа дна и конфигурации побережья [25, 27], проявляются тем больше, чем выше средняя скорость роста среднесуточного атмосферного давления. Прохождение антициклонов в зимний период приводит к увеличению скорости течений в проливе и, как следствие, к усилению механического воздействия имеющихся здесь ледовых образований на суда и гидротехнические сооружения. В суровые и умеренные зимы по Керченскому проливу движется лед, увлекаемый из Азовского в Черное море течением, которое принято называть азовским [10]. Скорость движения льда между опорами моста и оказываемое на них механическое воздействие тем больше, чем больше ско-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема 827-2020-0002, шифр “Оперативная океанология”).

рости течения в проливе. В прошлом именно такое воздействие послужило причиной разрушения прежнего автомобильного моста через северную узкость пролива, построенного в 1944 г.

Известно, что определяющий фактор ледовых условий на Азовском море и в Керченском проливе – суровость соответствующей зимы [4–6, 16, 17]. Ледовый сезон в Керченском проливе начинается в середине декабря и завершается к концу марта, а отдельные ледовые образования на Азовском море встречаются и в апреле. В мягкие зимы лед в проливе практически не наблюдается [3, 6]. В ледовые сезоны в 1955–2014 гг. в Керченском проливе экспедициями Севастопольского отделения Государственного океанографического института (СО ГОИН) им. Н.Н. Зубова проводился мониторинг изменений средней скорости течения. Из анализа этих данных следует, что средняя скорость течения на створе о. Тузла составляет 0.14–0.18 м/с, в северной узкости пролива (на трассе паромной переправы порт Крым – порт Кавказ) – 0.7–0.83 м/с [6, 7].

Известны результаты численного анализа скорости течений в Керченском проливе с использованием различных численных моделей. Исследование ветровых течений в Керченском проливе на основе двухслойной численной модели выполнено в [14]. Данные моделирования с использованием сигма-координатной гидродинамической модели Princeton Ocean Model (POM) [26] позволили выполнить анализ течений, возникающих при прохождении циклонов и антициклонов над Азовским морем [21], и исследовать влияние их геометрических и эволюционных параметров на скорости вызываемых ими течений [22, 23]. В [22] показана значимость резонансного механизма в возникновении экстремально высоких амплитуд стонно-нагонных колебаний и сейш, генерируемых циклонами. Предложенное в [8] исследование эволюции льда в Керченском проливе выполнено с использованием локально-одномерной модели термодинамики формирования и таяния льда.

Однако анализ метеорологических явлений, связанных с повышением атмосферного давления над Азовским морем, способных формировать анемобарическую волну у входа в Керченский пролив, ранее не проводился. Также не исследовалась межгодовая скорость роста атмосферного давления, связанная с прохождением антициклонов в зимы разной суровости. Это не позволяет выполнить анализ вероятных рисков, вызванных прохождением атмосферных возмущений над Азовским морем, и максимумов скорости азовского течения на различных створах Керченского пролива.

В настоящей работе исследуются гидрометеорологические явления, возникающие в Керчен-

ском проливе при перемещении антициклонов над Азово-Черноморским регионом с северных румбов. Эти антициклоны, вызывающие менее сильные ветры, чем черноморские циклоны [6, 7, 15], – причина нагонов в северной части Керченского пролива и интенсивного перемещения ледовых образований, формирующихся в акватории Азовского моря, способствующих повышению навигационных рисков и повреждению опор моста [2, 3, 6, 16, 17].

Цель настоящей работы – прогнозирование максимальных скоростей азовского течения, возникающего при перемещении обширных областей повышенного давления к северному входу в Керченский пролив. Прогноз подразумевает расчет скорости течений, отвечающих случаям экстремального повышения атмосферного давления, за период 1948–2017 гг. по данным реанализа NCEP/NCAR [1]. Оценка скорости течений на различных створах пролива основана на анализе результатов трехмерного гидродинамического моделирования POM и численного решения уравнения Сен-Венана для метеорологических ситуаций с наибольшим повышением атмосферного давления за 1948–2017 гг. по данным реанализа NCEP/NCAR.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### *Источники данных наблюдений о среднесуточных изменениях атмосферного давления в Азово-Черноморском бассейне*

Наблюдения, позволяющие оценить колебания атмосферного давления в акватории Азовского моря и Керченского пролива за продолжительный период, обеспечены данными двух источников. Прежде всего использованы данные режимных наблюдений за изменениями основных метеорологических параметров, в том числе и атмосферного давления, полученные на многочисленных метеостанциях России и Украины, расположенных на побережье Азовского моря. Полученные данные, находящиеся в архиве СО ГОИН, использованы при анализе приведенных к уровню моря среднесуточных значений атмосферного давления за период 01.01.1948–31.12.2017.

Другой важный источник данных о распределении приведенного к уровню Мирового океана среднесуточного атмосферного давления над регионами Европы – реанализ NCEP/NCAR [1]. Представленная в нем информация соответствует узлам координатной сетки с шагом 2.5°. Оценка соответствия данных реанализа NCEP/NCAR информации, полученной при фактических наблюдениях в Азово-Черноморский бассейне и Керченском проливе, ранее не проводилась. Поэтому предварительно с целью определения корректности использования данных NCEP/NCAR для ре-

шения задач данного исследования выполнено их сопоставление с данными режимных наблюдений в пунктах Опасное, Мысовое и Тамань за период 01.01.1972–31.03.1988.

Для получения этих оценок выполнена интерполяция результатов реанализа NCEP/NCAR в узлах между  $15^\circ$ – $45^\circ$  в.д. и  $40^\circ$ – $80^\circ$  с.ш. с использованием метода триангуляции Делоне [19]. Полученные результаты интерполяции для каждого пункта сопоставлены с вычисленными по фактическим данным значениями среднесуточного атмосферного давления (что позволило определить их относительную погрешность). Также для каждого пункта наблюдений по критерию Стьюдента оценена значимость статистической связи между результатами интерполяции и фактическими значениями [11]. Установлено, что относительные погрешности результатов интерполяции не  $\leq 5\%$  от амплитуд сезонных изменений атмосферного давления с достоверностью 99%, что свидетельствует о допустимости использования данных реанализа NCEP/NCAR при решении поставленных задач. Оценка среднесуточных значений атмосферного давления над акваторией Азовского моря выполнена методом Монте-Карло [29]. Для этого в 100 выбранных пунктах осредняются результаты интерполяции NCEP/NCAR, относящиеся к одним и тем же суткам.

#### *Используемая гидродинамическая модель и ее параметры*

Результаты гидродинамического моделирования, позволяющие прогнозировать максимальные величины нагонов и скорости поверхностных течений на северном входе в Керченский пролив, получены при использовании трехмерной сигма-координатной модели РОМ, адаптированной к условиям Азовского бассейна [21, 26]. Математическая модель основана на уравнениях турбулентного движения вязкой жидкости в приближении гидростатики [20]. Параметризация коэффициентов вертикальной вязкости и турбулентной диффузии выполнена в соответствии с дифференциальной моделью Меллора–Ямады [31], коэффициента горизонтальной вязкости – с использованием модели подсеточной вязкости [33]. Проекция касательных напряжений ветра вычислены по значениям его скорости на стандартной метеорологической высоте с поправкой на коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности моря [35]. Принято допущение о равенстве нулю нормальной составляющей скорости на дне пролива и о задании придонных касательных напряжений, связанных со скоростью по логарифмическому закону. На боковых границах выполняются условия непротекания. Модельный бассейн включает в себя Азовское море и Керченский пролив с жидкой границей,

проходящей вдоль акватории Черного моря по разрезу  $44.81^\circ$  с.ш. Здесь выполняется условие отсутствия потока жидкости, перпендикулярного боковым границам ( $\partial U_n / \partial n = 0$ ), и равенство нулю касательных напряжений ( $U_\tau = 0$ ),  $\mathbf{n}$  и  $\boldsymbol{\tau}$  – векторы, указывающие нормальное и касательное направления [21, 26]. Также предполагается, что в начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна. Шаги интегрирования по временным и пространственным координатам выбраны в соответствии с критерием устойчивости Куранта для баротропных волн [28].

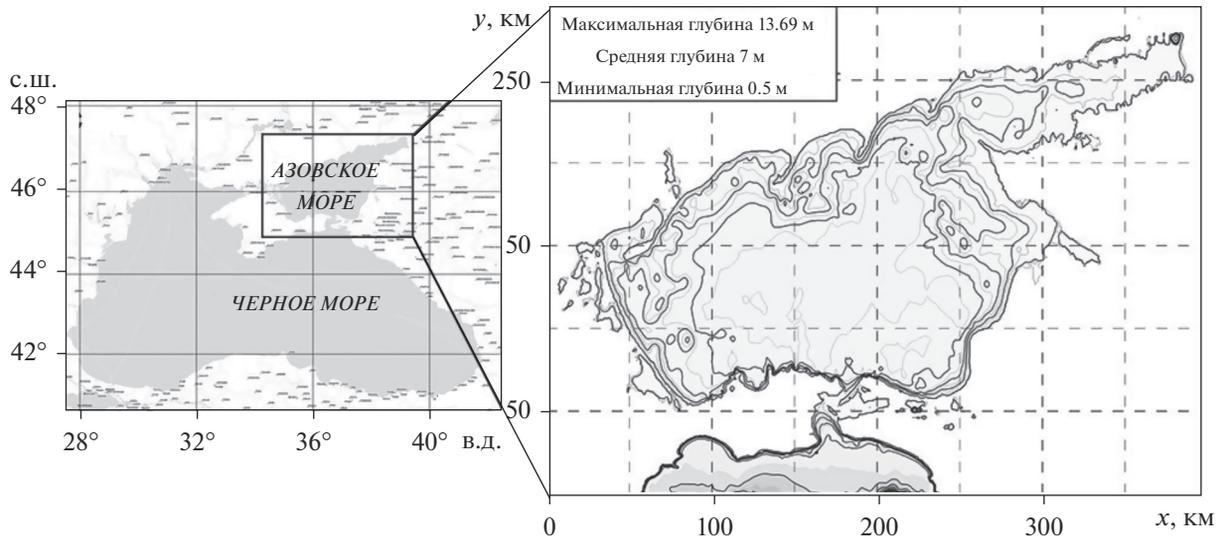
Исходные данные для моделирования – информация о батиметрии и конфигурации береговой линии Азовского моря, Керченского пролива и примыкающей к нему части Черного моря, полученная путем оцифровки карт Гидрографической службы (рис. 1). Пространственное разрешение модельной прямоугольной сетки, покрывающей всю территорию исследуемого бассейна ( $44.5^\circ$ – $48^\circ$  с.ш. и  $34^\circ$ – $40.02^\circ$  в.д.), по горизонтальным координатам составляет 1 км, число расчетных уровней по вертикали равно 11.

#### *Информация о полях ветра и атмосферного давления, используемых в численных экспериментах*

Задание атмосферного форсинга в модели РОМ реализовано при помощи данных региональной атмосферной модели SKIRON [30], интерполированных в узлы расчетной сетки области исследования (рис. 1). Данные мезомасштабной прогностической модели SKIRON являются более подробными, чем реанализ NCEP (National Centers for Environmental Prediction), и обеспечены развитием численной Eta-модели. Используемый вариант модели SKIRON представляет собой 72-часовой прогноз метеорологических параметров для Азово-Черноморского и Средиземноморского бассейнов, доступный каждые 2 ч с разрешением  $0.1^\circ$  по широте и долготе. Модель предоставляет 16 различных параметров, обеспечивающих обмен данными между океаном и атмосферой, 3 из которых учитываются в настоящих расчетах: атмосферное давление, меридиональная и зональная составляющие скорости ветра.

#### *Уравнения модели, используемой для прогнозирования скорости течений на створах Керченского пролива*

Расчет движения льда в Керченском проливе выполнен отдельно на основе решения уравнений Сен-Венана и Шези, использование которых обусловлено отсутствием соответствующего блока в трехмерной гидродинамической модели РОМ. Волны, возникающие под действием атмосферных возмущений северных направлений,



**Рис. 1.** Расположение на карте области исследования – Азовское море, Керченской пролив и примыкающая к нему часть Черного моря (справа, в синем прямоугольнике). Батиметрическая сетка области исследования, используемая в численных экспериментах (слева).

проходящие вдоль Керченского пролива, формируются при резком превышении уровня на его северном входе, примыкающем к Азовскому морю. Прохождение нагонной волны аналогично прохождению волны прорыва, возникающей при разрушении плотины, но движущейся не по сухому дну русла, как обычно волна прорыва, а по поверхности воды. Даже небольшое повышение уровня моря у входа в пролив вызывает большие приповерхностные скорости в районе прохождения фронта и обуславливает перенос значительной массы воды (волна перемещения). Это недостаточно изученное гидравлическое явление исследуется с использованием простой модели, учитывающей его основные особенности. Расчет квазиравномерного течения в проливе проводится на основе численного решения уравнения Шези (1) и уравнения неразрывности (2):

$$v_i = C_i \sqrt{R_i I}, \quad (1)$$

$$Q_i = v_i \omega_i, \quad (2)$$

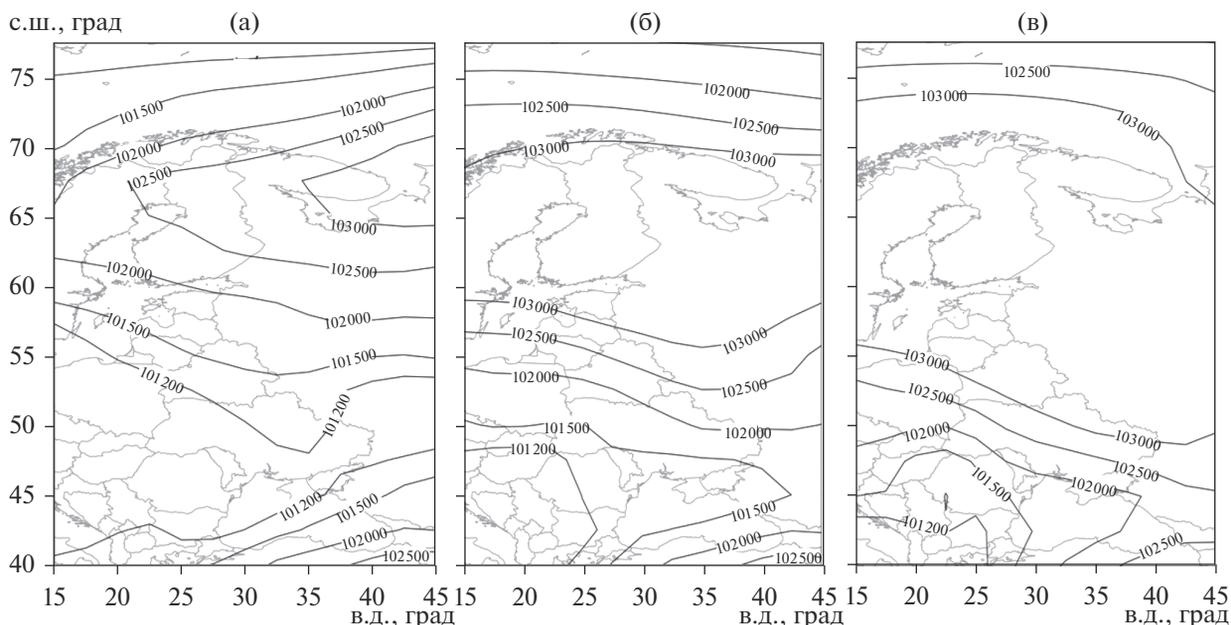
где  $i$  – номер сечения;  $v_i$ ,  $Q_i$  – осредненные по живому сечению скорости и расходы жидкости соответственно;  $C_i = (R_i)^{y_i}/n$  – коэффициенты Шези, определяемые по формуле Н.Н. Павловского [9];  $n$  – коэффициент шероховатости;  $\omega_i$  – площади живых сечений;  $R_i = \omega_i/\chi_i$  – гидравлические радиусы сечений потока жидкости;  $I$  – постоянный по длине канала гидравлический уклон;  $\chi_i$  – смоченный периметр в  $i$ -м сечении русла;  $y_i = -0.13 + 2.5n^{0.5} - 0.75(n^{0.5} - 0.1)R_i^{0.5}$  – показатель степени в формуле для коэффициентов Шези.

Учет формы поперечных сечений русла при уточнении скоростей в рамках плановой задачи гидравлики выполнен с помощью приближенной методики М.А. Великанова [19, 24]. Расчет неустановившегося движения потока проведен путем численного решения системы нелинейных уравнений Сен-Венана, базирующейся на уравнении динамики (2) и уравнении неразрывности (3):

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Здесь  $y = y(x, t)$  – координата свободной поверхности потока жидкости;  $x$  – продольная координата;  $t$  – время;  $S_0$  – уклон дна;  $S_f$  – гидравлический уклон;  $A(x, t)$  – площадь сечения потока жидкости;  $Q(x, t)$  – расход потока жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения. Численное решение системы (3)–(4), в записи которой использованы стандартные обозначения, основано на методе расщепления по физическим процессам и переменным состояниям [19]. При этом на основе заданного предварительно распределения искомых величин  $y(x, t)$  по предиктор-корректорной схеме последовательно определяются производные, входящие в уравнения (3) и (4), которые затем снова корректируются до достижения заданной точности расчета.



**Рис. 2.** Распределения среднесуточных значений приведенного к уровню моря приземного атмосферного давления (Па) над Восточной Европой по данным NCEP/NCAR: а – 5.02.2017, б – 6.02.2017, в – 7.02.2017.

## АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### *Анализ метеорологических данных*

Поиск случаев атмосферных антициклонических возмущений в ледовые сезоны 1948–2017 гг., приводящих к резкому повышению атмосферного давления в Керченском проливе, выполнен на основе анализа синоптических карт, построенных по данным реанализа NCEP/NCAR. На первом этапе из многолетнего массива данных NCEP/NCAR отбираются данные, отвечающие случаям повышения атмосферного давления за текущие и предыдущие сутки. Предполагается, что средняя скорость увеличения среднесуточного атмосферного давления на северном входе в Керченский пролив  $> 1$  гПа/сут. Далее рассматриваются атмосферные возмущения, перемещающиеся с северных румбов, для которых на синоптической карте антициклон располагается южнее, чем в предыдущие сутки. В результате получены наборы карт, содержащие дату и отражающие сценарии прохождения антициклонов с северных румбов за период 1948–2017 гг. Их анализ показывает, что повышение атмосферного давления над Азовским морем связано с вторжением арктического воздуха в Европейском секторе. Кроме того, происходит формирование субмеридионального барического гребня, распространяющегося с восточного отрога Сибирского антициклона или западного отрога Сибирского антициклона. При этом в период 1948–1991 гг. атмосферное давление наиболее часто повышалось при вторжениях арктических воздушных масс, в

последующие годы повторяемость макроциркуляционных процессов практически выровнялась [32].

Пример синоптических карт за 5–7 февраля 2017 г., отвечающих наибольшему количеству случаев повышения атмосферного давления за период 1948–2017 гг., приведен на рис. 2. Как видно, над Азовским морем (5.02.2017) располагается обширная область повышенного атмосферного давления со среднесуточным значением  $\sim 1012$  гПа (рис. 2а). Эта область, часть Арктического антициклона, находится также над Скандинавией, регионами Северо-Западного Федерального округа России и Баренцевым морем, а не связанный с ней субтропический антициклон располагается над территорией Турции и Кавказом.

Через сутки (6.02.2017) происходит вторжение арктического воздуха, которое приводит к образованию субмеридиональной полосы повышенного атмосферного давления, соединяющей сегмент Арктического антициклона с Субтропическим антициклоном (рис. 2б). Проникновение арктического воздуха в регионы Европейской территории России, расположенные в умеренных широтах, приводит к повышению атмосферного давления над Азовским морем до 1015 гПа. Продолжающееся вторжение арктического воздуха в следующие сутки (7.02.2017) приводит к росту атмосферного давления над Азовским морем на 9 гПа и к расширению полосы повышенного давления (рис. 2в).

Сравнивая рис. 2б и 2в, отметим смещение изображенных на них изобар над акваторией

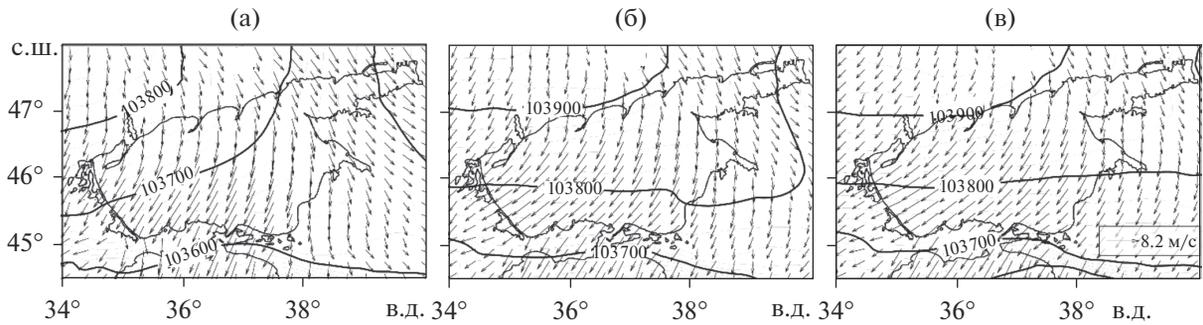


Рис. 3. Барическое поле (Па) и ветер над Азовским морем по данным SKIRON: а – 5.02.2017, б – 6.02.2017, в – 7.02.2017.

Азовского моря с СВ в сторону северного входа в Керченский пролив. Следовательно, рассматриваемый антициклон был способен вызвать значимые изменения скорости течения в проливе и повысить скорость течения из Азовского моря в Черное. Из рис. 2в следует, что атмосферное давление над Азовским морем было значительно выше, чем над прилегающей к южному входу в Керченский пролив акваторией Черного моря. Последнее (вследствие закона сообщающихся сосудов) также не могло не вызывать увеличения скорости азовского течения. Особенности изменения распределения атмосферного давления над Приазовским регионом, которые проявились 5–7 декабря 2015 г., типичны и для других случаев повышений атмосферного давления при движении антициклонов с северных румбов, проанализированных за период 1948–2017 гг.

*Анализ отклонений уровня моря и течений в Керченском проливе по результатам трехмерного моделирования*

Трехмерное гидродинамическое моделирование нелинейных процессов в исследуемой области (рис. 1) проведено с целью определения максимальных отметок уровня моря и скорости течений в поверхностном и глубинных слоях Керченского пролива при прохождении обширных областей повышенного атмосферного давления над Азовским морем. Расчеты проведены для двух временных периодов, отвечающих наибольшим повышением атмосферного давления за 1948–2017 гг. В соответствии с изложенной выше методикой значительные повышения атмосферного давления, по данным NCEP/NCAR, обнаружены в декабре 2015 г. и феврале 2017 г.

В качестве форсинга для модели общей циркуляции океана POM используются данные реанализа SKIRON более подробные, чем данные NCEP/NCAR. Карты скорости ветра и атмосферного давления над Азовским морем по данным SKIRON, используемые в численных экспериментах, продемонстрированы на рис. 3 (5–7 фев-

раля 2017 г.). Из сравнения данных, представленных на рис. 2 и 3, видно, что карты барической топографии согласуются со среднесуточными синоптическими данными реанализа NCEP/NCAR. Как видно из рис. 3, перемещение обширного барического образования к Черному морю при скорости ветра до 8 м/с в течение трех суток практически не меняет направление его движения (с северного на северо-западное) к северному входу в Керченский пролив. Анализ временного хода осредненных по пространству значений атмосферного давления по данным SKIRON в декабре 2017 г. показывает его повышение в первой декаде от 1009.9 до 1038.9 гПа со средней скоростью 9.5 гПа/сут.

Результаты расчета скорости течений из Азовского моря в Черное, полученные в двух экспериментах, приведены в табл. 1. Значения скорости приведены в пунктах  $P_1$ – $P_5$ , показанных на рис. 4, эквидистантно расположенных у северного входа в Керченский пролив на широте 45.45° с.ш. (пункт  $P_3$  точно на фарватере). Данные моделирования, полученные с дискретностью 3 мин, позволяют установить, что максимумы скорости течений приходятся на одни и те же сутки и отмечаются в центре пролива (пункт  $P_3$ ), а наименьшие значения имеют место у западной границы пролива (пункт  $P_1$ ). Осредненные и максимальные значения скорости течений в центральной части пролива в 1.5–1.7 больше, чем соответствующие значения скорости на его западной границе. Для рассматриваемых периодов максимумы скорости течений, отмеченные 6.12.2015, достигают значений: 80 см/с – в приповерхностном слое моря, 64 см/с – в среднем по глубине. Данные моделирования позволяют сравнить среднемесячные значения скорости течения в Керченском проливе в рассматриваемые периоды с соответствующими пиковыми значениями, вызванными прохождением антициклона. Отметим превышение последних на 30 (в декабре 2015 г.) и 21 см/с (в феврале 2017 г.).

**Таблица 1.** Максимумы скорости азовского течения (см/с) в поверхностном слое и осредненные по вертикали в пунктах северного входа в Керченский пролив в декабре 2015 г. и феврале 2017 г.

Пункты	1–31 декабря 2015 г.		1–28 февраля 2017 г.	
	средние	поверхностные	средние	поверхностные
$P_1$	37	45	35	50
$P_2$	41	48	37	44
$P_3$	64	80	56	69
$P_4$	47	54	45	48
$P_5$	50	53	53	61

**Таблица 2.** Разность уровня моря (см) в пунктах северного входа в Керченский пролив по отношению к среднему уровню на его южном створе в моменты времени достижения максимумов азовского течения

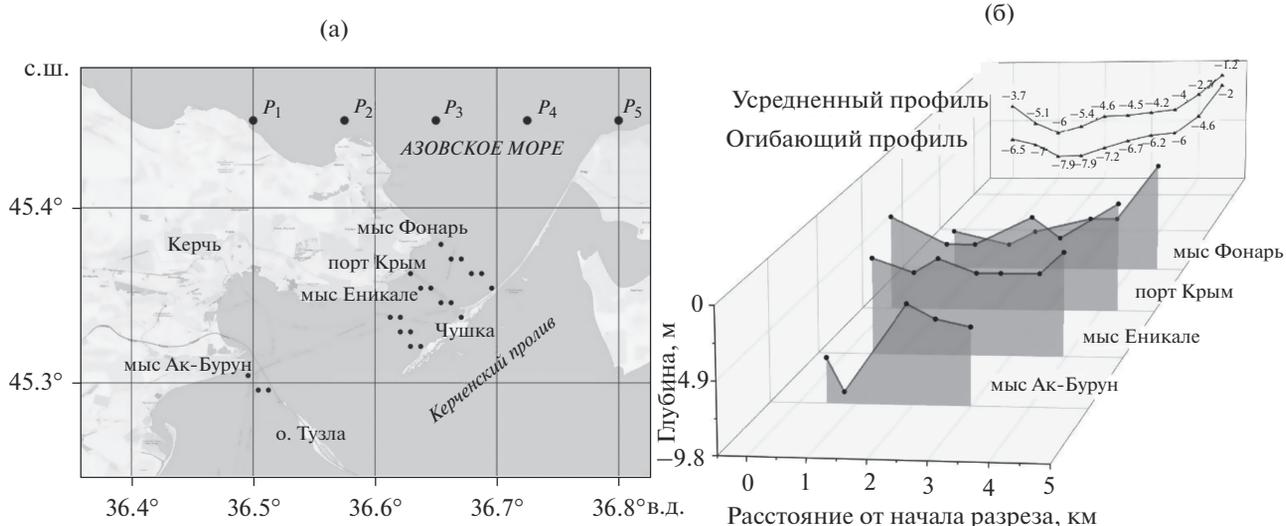
Дата	Время	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
06.12.2015	22:00	26	7	17	2	21
24.02.2017	15:45	24	7	13	1	22

Перемещение антициклона над регионом приводит также к повышению уровня Азовского моря у северного входа в Керченский пролив, обусловленному нагоном воды. В табл. 2 представлены данные моделирования уровня моря в пунктах  $P_1$ – $P_5$  в моменты достижения максимумов азовского течения. Как следует из анализа этих данных, в декабре 2015 г. и феврале 2017 г. наибольшие превышения уровня моря (26 и 24 см) на северном входе в Керченский пролив по

отношению к среднему уровню моря на южном створе пролива имеют место в пункте  $P_1$ .

#### Результаты расчета скорости течений на створах Керченского пролива

Керченский пролив рассматривается как русло, в котором однонаправленное движение потока жидкости создается стабильным во времени перепадом уровня воды, отвечающего преобладающему направлению из Азовского моря в Чер-



**Рис. 4.** Схема расположения профилей и пунктов  $P_1$ – $P_5$  в Керченском проливе (а); схема построения профилей (огибающего и усредненного), используемых в численных расчетах (б).

ное. Оценка максимально возможной скорости азовского течения на створе о. Тузла на основе численного решения уравнения Шези выполнена с учетом результатов трехмерного гидродинамического моделирования скорости течений в пунктах  $P_1$ – $P_5$  (табл. 1), а также превышений уровня моря в пунктах северного входа в Керченский пролив по отношению к среднему уровню моря на южном створе пролива (табл. 2). При оценке скорости течения из Азовского моря в Черное на створе о. Тузла учтены площади поперечных сечений пролива на этих створах. Как следует из [14], площадь сечения Керченского пролива на его северном створе (порт Крым – порт Кавказ) составляет 26 км<sup>2</sup>, а на створе о. Тузла (м. Ак-Бурун – о. Тузла) – 12 км<sup>2</sup>. Предварительно проанализированы четыре профиля, нанесенных вдоль Керченского пролива от м. Фонарь до о. Тузла (рис. 4).

Из четырех рассмотренных профилей выделено “минимальное сечение” путем построения верхней огибающей совмещенных профилей. Далее “минимальное сечение” и усредненное еще раз усреднены. Таким образом, полученный профиль русла учитывает как стремление потока перемещаться в свободном пространстве, так и влияние рельефа дна на его движение. В пределах расчетного профиля четко выделяются две зоны – мелководье, расположенное в основном в левой части русла, и углубленная часть с правой стороны ближе к Крымскому берегу. В углубленной части максимальная глубина потока составляет 7–8 м, ширина этой зоны поверху ~1 км. Именно в этой зоне будут наблюдаться повышенные скорости потока во всех поперечных сечениях.

При учете неоднородности сечений канала установлено местное повышение скорости течений из Азовского моря в Черное при одностороннем сжатии потока на створе Керченского моста. Отношение площади сечения на створе к средней площади сечений на рассматриваемом участке (0.82) обуславливает возрастание средней скорости течений 0.64 м/с в 1.22 раза. Следовательно, перемещение антициклонов с северных румбов способно приводить к увеличению скорости поверхностных течений на створе о. Тузла на 0.54 м/с. Повышение скоростей до 1.18 м/с, обусловленное углублением потока в центральной части пролива и переформированием поля скоростей за счет сужения русла, может представлять опасность как для судов, проходящих между опорами моста, так и для самих этих опор в ледовые сезоны.

Анализ результатов численного решения системы уравнений (3)–(4) показал, что высота волны прорыва, равная в начале канала 0.25 м, убывает по его длине, достигая на створе Керченского моста 0.045–0.05 м. Соответственно, убывают и индуцированные этой волной скорости тече-

ний до 0.69–0.8 м/с. При наличии стационарных течений скоростью 0.56–0.64 м/с (табл. 1) возможно достижение скорости течений в проливе до 1.5–1.6 м/с за счет скорости движения волны прорыва. Время этого увеличения скорости соизмеримо периоду времени взаимодействия волны прорыва, движущейся со скоростью распространения гравитационных волн, с опорами моста. Для исследуемых условий при средней глубине потока ~4 м скорость волны прорыва составляет ~6 м/с ( $v = (gh)^{0.5}$ ,  $h$  – глубина потока). При этом время воздействия потока с такой скоростью будет небольшим (порядка 1–2 с). За это время вероятность одновременного с потоком жидкости воздействия льда на опору моста (фронтального или бокового) пренебрежимо мало, так как воздействие отдельно плавающих льдин происходит с интервалом больше указанного периода. Поэтому это увеличение скорости течений, связанное с прохождением волны прорыва через Керченский пролив, можно не учитывать при составлении прогнозов рисков повреждения опор моста.

*Анализ повторяемости случаев  
повышения атмосферного давления  
в Азово-Черноморском регионе*

Анализ суровости зим в Азово-Черноморском регионе по методике, предложенной в [32], показал, что за период 1948–2017 гг. суровые зимы в районе Керченского пролива наблюдались до 1987 г. В последние 30 лет здесь наблюдались либо мягкие, либо умеренные зимы [2]. За это время было 12 умеренных и 18 мягких зим (за предыдущее тридцатилетие – соответственно 15 и 11, 4 зимы были суровыми), что подтверждается выводами, представленными в [5]. В современный период (2005–2017 гг.) отмечено 4 умеренные зимы при увеличении повторяемости мягких зим и отсутствии суровых. В последние годы в южных регионах России, на Каспийском и Азовском морях преобладают рекордно суровые зимы, а лед в прибрежной зоне стоит до 80 дней [13].

Для каждого месяца ледового сезона за период 1948–2017 г. оценена повторяемость явлений, характеризующихся повышением атмосферного давления со средней скоростью, превышающей 500 и 1000 Па/сут. Для этого определено общее число антициклонов и соответствующие каждому из них максимальные скорости роста атмосферного давления. Из полученных оценок сформированы временные ряды, используемые для определения вероятности случаев повышения атмосферного давления и тенденций их повторяемости. Отношения найденного количества случаев к общему количеству суток в месяцы ледового сезона, усредненные в скользящем окне длиной 30 лет, рассматриваются в качестве тенденций повторяемости [11].

Для любых зим повторяемости повышения атмосферного давления со средней скоростью <500 Па/сут уменьшаются по сравнению с повторяемостью этих явлений со скоростью, превышающей 1000 Па/сут. В мягкие зимы 1966–2017 гг., особенно в период после 1985 г., повторяемость случаев повышения атмосферного давления стремительно возрастает. Из этого следует, что за период 1966–2017 гг. повторяемость случаев повышения атмосферного давления, при которых в Керченском проливе могут возникать ощутимые изменения скорости азовского течения, увеличилась. Наиболее заметные тенденции увеличения разности средних значений атмосферного давления в Азово-Черноморском регионе в 2005–2017 гг. проявляются в декабре–январе по сравнению с февралем–мартом. Последнее позволяет прогнозировать навигационные риски, обусловленные увеличением скорости азовского течения в Керченском проливе в декабре и январе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлено, что при движении антициклонов с северных румбов скорости течений из Азовского моря в Черное достигают наибольших значений при прохождении створа о. Тузла, имеющего минимальную площадь поперечного сечения. Полученные выводы основаны на анализе результатов трехмерного гидродинамического моделирования и решения оценочного уравнения Сен-Венана. Максимумы скорости течений в Керченском проливе рассчитаны для периодов наибольшего повышения атмосферного давления в Азово-Черноморском регионе по данным реанализа NCEP/NCAR за 1948–2017 гг. Выполнен прогноз гидравлического явления, заключающегося в переносе массы воды по поверхности канала, и исследованы условия распространения волны прорыва, приводящей к значительному (до 1.6 м/с), но кратковременному повышению скоростей течения в Керченском проливе. Это повышение можно не принимать во внимание при оценке воздействия льда на опоры моста. Однако при прогнозировании скорости течений в проливе, вызванных повышением атмосферного давления, следует учитывать возможное увеличение скорости до 1.2 м/с, связанное с местным углублением русла у опор моста и со сжатием струй перед створом о. Тузла.

В современный период (2005–2017 гг.) потепление климата и превышение числа мягких зим над умеренными обуславливают снижение риска повреждения опор моста через Керченский пролив движущимися ледовыми образованиями по сравнению с серединой XX в. Вместе с тем учет этого риска представляется целесообразным, поскольку возрастает вероятность случаев повыше-

ния атмосферного давления со скоростью, превышающей 1000 Па/сут, и в будущем умеренные и суровые зимы могут повториться.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атмосферный реанализ среднесуточных значений атмосферного давления. [Электронный ресурс]. [http:// https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncer.reanalysis.html](http://https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncer.reanalysis.html)
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. 234 с.
3. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1. Азовское море. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. 402с.
4. Дубинин М., Поспелов И. Источники метеорологических данных на территорию РФ по станциям. [Электронный ресурс]. <http://gis-lab.info/ga/meteo-station-soursis.html>
5. Думанская И.О., Котилевская А.М. Оценка возможности использования прогностических методов XX века в современной практике ледового обслуживания мореплавания на неарктических морях России // Тр. ГМЦ РФ. 2009. Вып. 343. С. 67–88.
6. Дьяков Н.Н., Тимошенко Т.Ю., Белогудов А.А., Горбач С.Б. Атлас льдов Черного и Азовского морей. Севастополь: ЭКОСИ-гидрофизика, 2016. 219 с.
7. Иванов В.А., Морозов А.Н., Шутков С.А., Зима В.В., Федоров С.В., Вержевская Л.В. Течения в Керченском проливе по данным натуральных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2018. № 4. С. 117–123.
8. Иванов В.А., Рябцев Ю.Н. Моделирование формирования и таяния льда в Керченском проливе // Метеорология и гидрология. 2018. № 1. С. 52–59.
9. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. М.: Энергия, 1972. 312 с.
10. Книпович Н. М. Гидрологические исследования в Азовском море: труды Азовско-Черноморской научно-промышленной экспедиции. М.: Шестой Октябрь, 1932. 496 с.
11. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Справочнику для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
12. Куркин А.А. Нелинейная и нестационарная динамика длинных волн в прибрежной зоне. Н. Новгород: НГТУ, 2005. 330 с.
13. Матишов Г.Г., Дашкевич Л.В., Кириллова Е.Э. Лед как индикатор изменения климата (на примере Баренцева и Азовского морей) // Наука Юга России. 2020. Т. 16. № 2. С. 27–40.
14. Матишов Г.Г., Чикин А.Л. Исследование ветровых течений в Керченском проливе с помощью математического моделирования // Вестн. ЮНЦ РАН. 2012. Т. 8. № 2. С. 27–32.
15. Мишуев А.В. Сладкевич М.С. Исследование параметров потока в зонах резкого изменения ширины канала при прохождении волны перемещения // Методы исследования и расчета волн, их воздействия на гидротехнические сооружения и берега // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике Л., 1982. С. 178–183.

16. Океанографический атлас Черного и Азовского морей. Киев: ДУ Укрморкартографія, 2009. 356 с.
17. *Панов Б.Н., Спиридонова Е.О.* Современные тенденции изменения характера атмосферной циркуляции в Азово-Черноморском регионе // Метеорология и гидрология. 2018. № 1. С. 43–51.
18. *Савенко В.Я.* Математические модели и методы расчета квазитрехмерных безнапорных потоков. Киев: Техника, 1995. 188 с.
19. *Скворцов А.В.* Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: ТГУ, 2002. 28 с.
20. *Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М.* Введение в гидродинамику и теорию волн. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 264 с.
21. *Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влияния параметров барических образований на свободные и вынужденные колебания уровня и течения в Азовском море // Морской гидрофиз. журн. 2016. № 4. С. 13–26.
22. *Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Численный анализ влияния скорости и направления продолжительно действующего ветра на циркуляцию вод Азовского моря с учетом и без учета водообмена через Керченский пролив // Океанология. 2018. Т. 58. № 1. С. 23–33.
23. *Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Численный анализ влияния параметров атмосферных фронтов на свободные и вынужденные колебания уровня и течения в Азовском море // Тр. ГОИН. Исследования океанов и морей. 2017. Вып. 218. С. 120–137.
24. *Щодро О.Є.* Побудова планової картини течії та просторових деформацій русла довольної форми // Гідроенергетика України. 2010. № 3. С. 36–39.
25. *Bautista E.G., Mendez F., Bautista O., Mora A.* Propagation of shallow water waves in an open parabolic channel using the WKB perturbation technique // Applied Ocean Res. 2011. V. 33. № 3. P. 186–192.
26. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of three-dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coast Ocean Models // Estuarine, Coastal Shelf Sci. 1987. V. 4. P. 1–16.
27. *Chang H.K., Lioul C.* Long wave reflection from submerged trapezoidal breakwaters // Ocean Engineering. 2007. V. 34. № 1. P. 185–191.
28. *Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H.* On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. 1967. March. P. 215–234.
29. *Fishman G.S.* Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications. // Springer Ser. Operations Res. Financial Engineering. 1996. 698 p.
30. *Kallos G., Nickovic S., Jovic D. et al.* The Regional Weather Forecasting System SKIRON and its capability for forecasting dust uptake and transport // Proc. WMO conf. dust storms. Damascus, 1997. № 1–6. Nov. P. 9.
31. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. 1982. V. 20. № 4. P. 851–875.
32. *Sirotkina A.I.* К вопросу об оценке суrowости зим на juzjnyh moriah // Trudy NIIAK. 1959. Iss. 8.
33. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // Mon. Wea. Rev. 1963. V. 91. № 2. P. 99–164.
34. *Tengt M.H., Wu T.Y.* Evolution of long water waves in variable channels // Fluid Mech. 1994. V. 266. P. 303–317.
35. *Wannawong W., Humphries U.W., Wongwises P. et al.* Mathematical Modeling of Storm Surge in Three Dimensional Primitive Equations // Int. Comp. Math. Sci. 2011. № 5. P. 44–53.