

А.Е. Букатов, Д.Д. Завьялов, Т.А. Соломаха

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНОСА ЛЬДА ИЗ АЗОВСКОГО МОРЯ В КЕРЧЕНСКИЙ ПРОЛИВ

На основе математической модели совместной динамики воды и льда выполнено моделирование адвекции льда из Азовского моря в Керченский пролив. Рассмотрена зависимость конфигурации и динамики зон скопления льда, распределения его концентрации в Керченском проливе от интенсивности и продолжительности действия ветра северных румбов.

Ключевые слова: динамика ледяного покрова, дрейф льда, Керченский пролив.

Введение. Ледовый покров — важная составляющая гидрологического режима Азовского моря и Керченского пролива. Припайный и дрейфующий лед лимитирует хозяйственную деятельность в регионе, существенно осложняет условия для судоходства, организации рейдовых перегрузочных работ и освоения прибрежной зоны. Характеристика ледового режима Азово-Керченского бассейна отражена в [1–8]. Она получена в результате анализа спутниковых снимков, материалов авиа-разведок, наблюдений с судов и прибрежных гидрометеорологических станций. Зависимость эволюции полей ледовитости и сплоченности льда в Азовском море от направления и продолжительности действия ветра рассмотрена в [9] на основе разработанной в [10] математической конечно-элементной модели совместной динамики воды и льда.

Ветры северных румбов способствуют подвижке льда в Азовском море по направлению к северной узости Керченского пролива, где происходит скопление значительного количества льда и создаются условия перемещения льда в Керченский пролив.

В настоящей работе выполнено моделирование адвекции льда из Азовского моря в Керченский пролив. Рассмотрена зависимость конфигурации и динамики зон скопления льда, распределения его концентрации в Керченском проливе от интенсивности и продолжительности действия ветра северных румбов.

Математическая модель. Рассмотрим дрейф льда из Азовского моря в Керченский пролив под воздействием обусловленных ветром динамических процессов. Исследование проведем на основе теоретической модели совместной динамики воды и льда, учитывающей особенности береговой линии и рельефа дна Азовского моря и Керченского пролива. Движение жидкости под льдом определяется двумерными уравнениями штормовых нагонов и уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{1}{\rho_w} [(\mathbf{U} \nabla) \mathbf{V} + \mathbf{V} \operatorname{div}(\mathbf{U})] = -\rho_w g H \nabla \zeta - H \nabla P_a - f \mathbf{k} \times \mathbf{U} + (1 - C) \boldsymbol{\tau}^a + C \boldsymbol{\tau}^i - \boldsymbol{\tau}^b, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_w H)}{\partial t} = -\operatorname{div}(\mathbf{U}). \quad (2)$$

Для описания состояния морского льда проведена дискретизация толщины льда по градациям, определяющим интервалы ее изменения. Перераспределение сплоченности C_n и массы льда m_n описывается уравнениями горизонтальной адвекции отдельно для каждой n -градации:

$$\frac{\partial m_n}{\partial t} = -\operatorname{div}(m_n \mathbf{u}_i), \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial t} = -\operatorname{div}(C_n \mathbf{u}_i). \quad (4)$$

В предположении, что скорость дрейфа льда одинакова для всех его градаций по толщине h_n , уравнение баланса импульса на поверхности моря имеет вид

$$m \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial t} = (\boldsymbol{\tau}^{ai} - \boldsymbol{\tau}^i) - m f \mathbf{k} \times \mathbf{u}_i - m g \nabla \zeta. \quad (5)$$

В уравнениях (1)–(5) $\mathbf{U} = \rho_w \int_{-h}^{\zeta} \mathbf{u} dz$ — вектор

полного потока; $\mathbf{u}(x, y, t)$, $\mathbf{u}_i(x, y, t)$ — средние по вертикали скорости течения и дрейфа льда; $H = h + \zeta$ — сумма отклонения свободной поверхности от невозмущенного уровня $\zeta(x, y, t)$ и глубины $h(x, y)$ моря; $f = 2\omega \sin \theta$ — параметр Кориолиса; $\mathbf{k}$ — единичный вектор, направленный вертикально вверх; ρ_a , ρ_w , ρ_i — плотность воздуха, воды и льда; m — суммарная масса льда (на единицу площади); g — ускорение свободного падения; P_a — атмосферное давление на поверхности воды; $\boldsymbol{\tau}^a$ — тангенциальное трение ветра; $\boldsymbol{\tau}^i$ — трение воды о лед. Тангенциальное трение ветра на поверхности льда $\boldsymbol{\tau}^{ai}$ принималось равным тангенциальному трению ветра на поверхности воды [11] и вычислялось по формуле

$$\tau^a = (\tau_x^a, \tau_y^a) = (\gamma^2 \rho_a W^2 \cos \theta, \gamma^2 \rho_a W^2 \sin \theta), \quad (6)$$

где W — скорость ветра; θ — угол между направлением ветра и осью X , ориентированной на восток; γ — коэффициент ветрового напряжения. Трение на границе лед–вода τ^i и на дне τ^b выражаются зависимостями

$$\tau^i = K_i \rho_w (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}) |\mathbf{u}_i - \mathbf{u}|, \quad \tau^b = (K_b H)^{-2} \rho_w^{-1} \mathbf{U} |\mathbf{U}|, \quad (7)$$

где $K_b = \chi^2 L n^{-2} (H/z_0)$; χ — постоянная Кармана; z_0 — параметр шероховатости донной поверхности.

На твердой границе области задавалось равенство нулю нормальной компоненты полного потока и скорости дрейфа:

$$\mathbf{u}_{in} = 0, \quad \mathbf{U}_n = 0. \quad (8)$$

На южной границе Керченского пролива ($45^\circ 6' \text{ с. ш.}$) задавались условия свободного выхода волн и льда в Черное море:

$$\frac{\partial u_i}{\partial n} = 0, \quad \mathbf{U}_n = \rho_w \zeta \sqrt{gH}. \quad (9)$$

В качестве начальных условий для воды и льда принималось состояние покоя, а первоначальное распределение функций сплоченности C_n и средней толщины льда в градациях h_n^* определялось по формулам

$$\mathbf{U}(x, y, t) = 0, \quad H(x, y, t) = h, \quad (10)$$

$$\mathbf{u}_i(x, y, t) = 0, \quad C_n = C_n^0, \quad m_n = \rho_i C_n^0 h_n^*. \quad (11)$$

Реализация модели и анализ результатов. Численный алгоритм решения уравнений (1), (2), (5) основан на использовании метода конечных элементов. Область решения — регион Азовского моря и Керченского пролива, аппроксимируемый объединением 582 треугольных конечных элементов, из которых 358 составляют расчетную область Азовского моря, а 224 — Керченского пролива. При построении нерегулярной расчетной сетки учитывались рельеф дна и конфигурация береговой черты Азовского моря и Керченского пролива.

Численный метод решения уравнений (3), (4) представляет собой реализацию алгоритма, изложенного в [10, 12]. Общая схема работы численной модели совместной динамики воды и льда представлена в [9, 10]. Моделирование перераспределения сплоченности и массы льда проводилось на регулярной прямоугольной сетке с учетом построенной в 2003 г. Тузлинской дамбы. Напомним, что временной шаг для определения $\mathbf{U}$, $\mathbf{u}_i$, ζ определялся из условия $\Delta t < \frac{1}{\sqrt{2}} L_i (gh)^{-1/2}$, а временной шаг для определения C_n , m_n — из условия $\Delta t_a < \frac{1}{2} \frac{L_r}{\max |\mathbf{u}_i|}$. Здесь L_i , L_r — максимальный горизонтальный размер треугольной и прямоугольной сеток соответственно. Отметим, что $\Delta t = j \Delta t_a$, где j — целое число.

Параметризация процесса торошения опреде-

ляется условием нормировки $C = \sum_{n=1}^N C_n \leq 1$ в расчетном районе (ячейке сетки), где N — количество градаций льда по толщине. Торошение льда считается возможным, когда уменьшается сплоченность льда первой ненулевой градации и увеличивается сплоченность следующей за ней градации при невыполнении условия нормировки. Если расчетный район был полностью покрыт льдом только последней градации $C = C_N = 1$, то использовалась процедура формализации дополнительного условия остановки дрейфа в шельфовой зоне.

Для оценки адвективного выноса льда из Азовского моря и динамики его распределения по акватории Керченского пролива проводились расчеты ледового дрейфа под воздействием ветров северных румбов. При численных экспериментах коэффициент K_i задавался равным $5,5 \cdot 10^{-3}$, а коэффициент Шези K_b определялся при значениях постоянной Кармана χ и параметра шероховатости z_0 , равных 0,4 и 0,01 соответственно.

Поскольку лед в Керченском проливе появляется позже, чем в Азовском море, в качестве исходной была принята ледовая обстановка, характеризующаяся отсутствием льда в проливе и равномерным распределением его площади по акватории Азовского моря. В начальный момент времени 30 % площади каждого элемента расчетной области занимал лед толщиной от 1 до 10 см, 20 % — от 10 до 20 см и 10 % — свыше 20 см. Таким образом, интегральная сплоченность льда в Азовском море принималась равной $C = 0,6$ (рис. 1), а масса льда на единицу площади составила порядка 92 кг при $\rho_i = 870 \text{ кг/м}^3$.

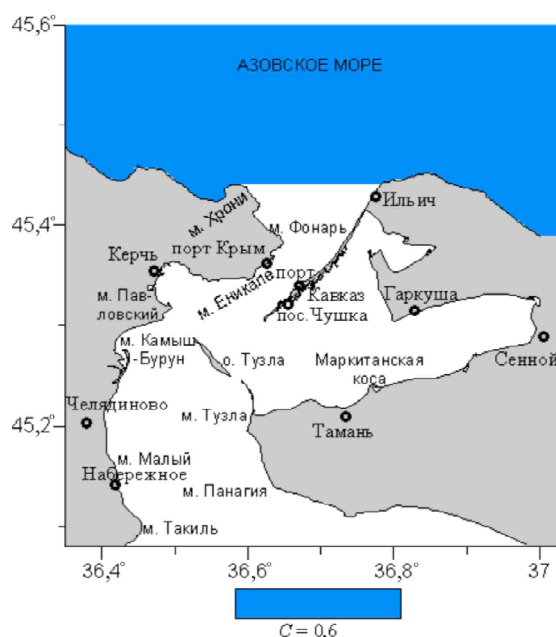


Рис. 1. Схема части расчетной области и начального распределения сплоченности льда

Эволюцию полей сплоченности льда, вынесенного из Азовского моря в Керченский пролив ветрами северо-западного (СЗ), северо-восточного (СВ) и северного направлений, иллюстрируют рис. 2–4 соответственно. Схематические изображения на рисунках рассчитаны для скоростей ветра 5 (а–г) и 10 м/с (д–е). Цифры в правом нижнем углу каждой из картинок показывают продолжительность дрейфа льда (в часах) с момента начала действия ветра.

Из рис. 2–4 видно, что характер выносной адвекции льда существенно зависит как от направления, так и от скорости ветра. Под действием слабого (до 5 м/с) СЗ ветра (рис. 2, а–г) лед не проникает в пролив южнее оконечности косы Чушка, скапливаясь преимущественно вдоль ее западного побережья. При заданных условиях азовский лед с северной окраины пролива до района порта Кавказ доходит примерно через 18 ч, формируя поле сплоченности 0,2–0,3, а уже к середине вторых суток – до 0,8 и более. В районе порта Крым даже после продолжительного времени действия ветра (рис. 2, г) сплоченность льда не превышает 0,2.

С увеличением скорости ветра СЗ направления схема адвекции льда может существенно из-

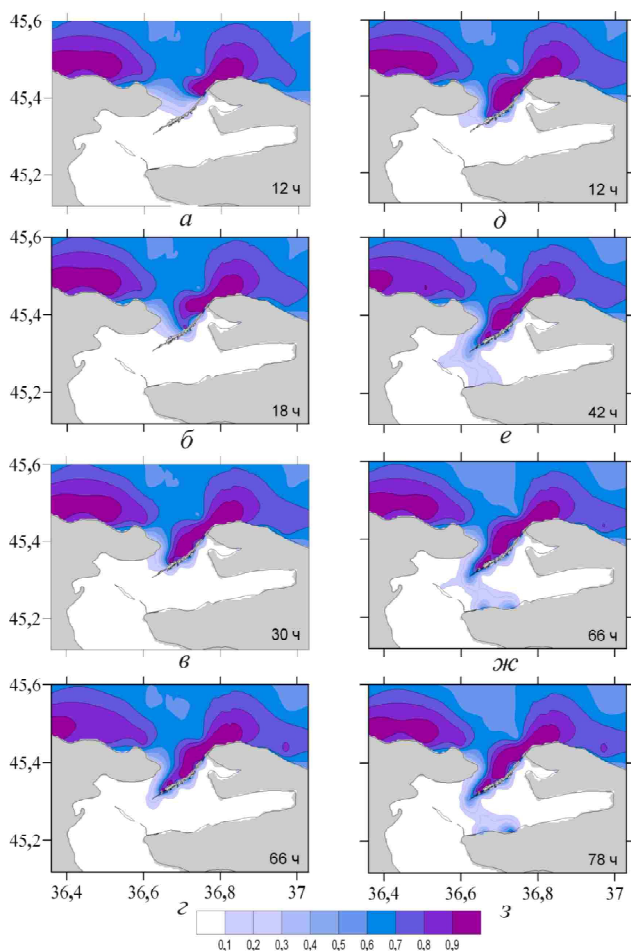


Рис. 2. Эволюция поля сплоченности льда, вынесенного из Азовского моря в Керченский пролив северо-западным ветром скоростью 5 (а–г) и 10 м/с (д–з)

мениться (рис. 2, д–з). Лед достаточно быстро дрейфует по всей ширине пролива, достигнув за 12 ч широты мыса Еникале. Примерно через сутки в прибрежных районах пролива, прилегающих к порту Кавказ, образуются поля льда сплоченностью до единицы. При дальнейшем продвижении вглубь пролива, пройдя южнее косы Чушка, дрейфующий лед делится на два обширных ледяных потока: первый движется к центральной части о-ва Тузла, второй – на юго-восток в район между косой Тузла и г. Тамань. Со временем первый поток ослабевает и примерно на четвертые сутки весь азовский лед будет дрейфовать к северо-западному берегу Таманского полуострова, формируя обширное прибрежное ледяное поле от северо-восточной окраины мыса Тузла до Марки-танской косы.

Характер выносной адвекции льда при СВ ветре иллюстрируют схемы, показанные на рис. 3. Следует отметить, что при продолжительном действии как слабых, так и умеренных ветров заданного направления лед, выносимый из Азовского моря, может преодолеть всю длину Керченского пролива. Вначале лед дрейфует вдоль западного побережья северной узости до мыса Еникале (рис. 3, а, д). Затем дрейф приобретает

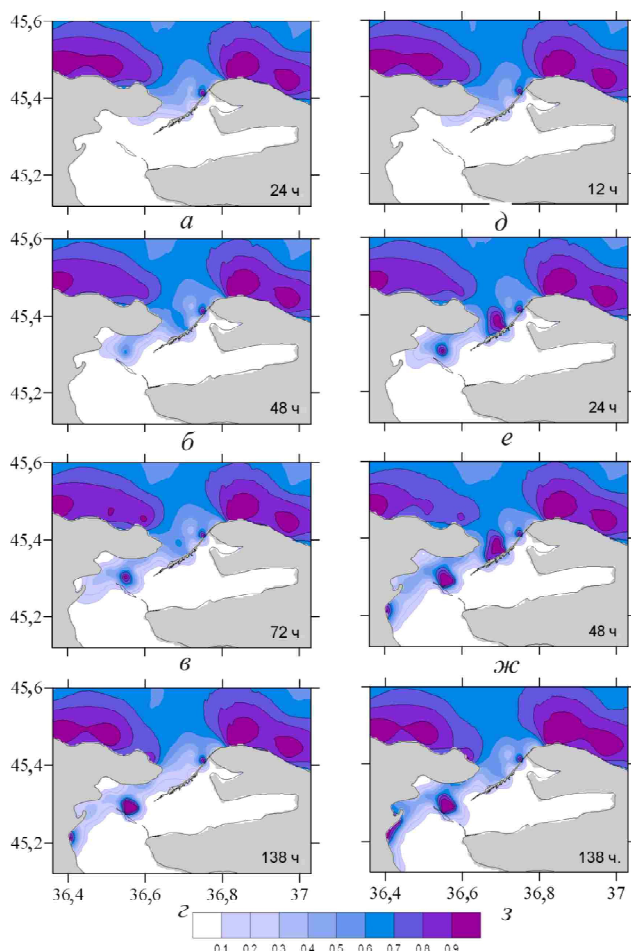


Рис. 3. Эволюция поля сплоченности льда, вынесенного из Азовского моря в Керченский пролив северо-восточным ветром скоростью 5 (а–г) и 10 м/с (д–з)

более выраженную южную составляющую, направленную в сторону северо-западной части о-ва Тузла. При скорости ветра $W = 5$ м/с выносной азовский лед достигнет прибрежной части острова через 36–38 ч, а при $W = 10$ м/с – через 16–18 ч. Далее, через Павловскую узость, лед попадает в юго-западную часть пролива, распределяясь вдоль побережья от мыса Павловский до мыса Малый приблизительно 5-километровой полосой со сплоченностью 0,2–0,5. Если действие ветра продолжается 6 сут и более, то дрейфующий лед может обогнуть мыс Такиль и выйти в Черное море. Во время дрейфа льда под действием СВ ветра наиболее вероятными местами торосов являются районы вблизи северо-западной части о-ва Тузла и севернее мыса Малого, где с течением времени происходит накопление льда и его сплоченность достигает 1,0 (рис. 3, а, б). Отметим также, что к концу первых суток воздействия умеренного СВ ветра в центральной части северной узости Керченского пролива начинает формироваться область повышенной сплоченности льда (рис. 3, в). Ледяное поле сплоченностью 0,8–1,0 охватывает здесь почти всю ширину пролива, не доходя лишь 1,5 км до западного берега у мыса Фонарь. Такая обстановка наблюдается еще около 3 сут с момента формирования, после чего лед из этой области постепенно уходит вглубь пролива и к середине пятых суток дрейфа сплоченность льда в данном районе пролива выравнивается со сплоченностью прилегающих районов. При малых скоростях ветра описанное явление выражено слабо.

Наиболее сложные ледовые условия, связанные в Керченском проливе с выносом льда из Азовского моря, реализуются под действием северного ветра. Даже при слабом ветре уже к концу первых суток у входа в Керченский пролив формируется полоса льда сплоченностью 0,7–1,0 (рис. 4, а). По прошествии полутора суток лед достигает о-ва Тузла и начинает накапливаться, образуя обширное ледяное поле вдоль всего северного побережья острова. Часть приходящего в последующем азовского льда будет оставаться у острова, образуя торосы и увеличивая область ледяного покрова большой сплоченности, а часть будет дрейфовать на юго-восток, обойдя к началу третьих суток остров со стороны Тузлинской промоины (рис. 4, б). Следует отметить, что некоторая часть льда будет задерживаться Тузлинской дамбой, образуя у ее северной оконечности ледяной покров высокой сплоченности.

Примерно еще через сутки плотные ледяные поля, расположенные с одной стороны в северной узости, а с другой – у берегов о-ва Тузла, соединятся, после чего вся северная часть пролива, а также область моря между островом и дамбой будет занята льдом сплоченностью 0,8–1,0. Если ветровой режим не изменится, то к шестым сут-

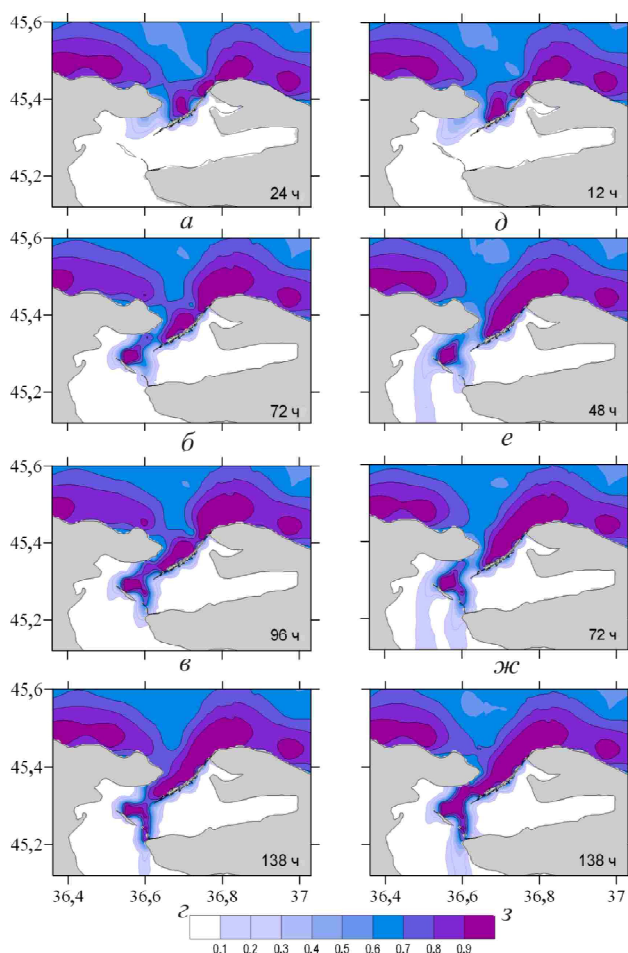


Рис. 4. Эволюция поля сплоченности льда, вынесенного из Азовского моря в Керченский пролив северным ветром скоростью 5 (а–д) и 10 м/с (е–ж)

кам после начала действия слабого ($W \leq 5$ м/с) ветра азовский лед, прошедший через Тузлинскую промоину, достигнет южной границы Керченского пролива. Ширина полосы выносимого из пролива в Черное море дрейфующего льда при заданных условиях составляет примерно 1,5–2 км, а сплоченность льда заключена в пределах от 0,6 вблизи Тузлинской промоины до 0,2 на выходе из пролива.

При умеренном северном ветре азовский лед доходит до берегов о-ва Тузла примерно за полувину суток, но в отличие от случая слабого ветра начинает обходить остров не с восточной, а с западной стороны (рис. 4, е). К концу вторых суток западный ледяной рукав уже достигнет южной оконечности Керченского пролива, тогда как восточный только начинает формироваться и доходит лишь до мыса Тузла. Со временем отток льда через Тузлинскую промоину усиливается и к середине третьих суток образуются уже два ледяных потока, огибающих остров с востока и с запада (рис. 4, ж). Подобный характер адвекции льда сохраняется примерно около полутора суток, после чего вынос льда через Павловскую узость убывает, а к началу шестых суток практически

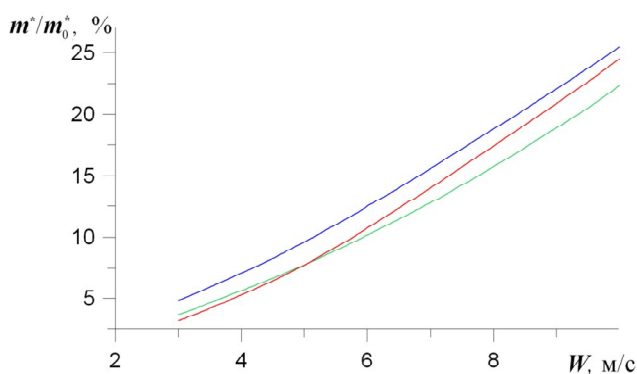


Рис. 5. Отношение массы m^* льда, поступившего в среднем с 1 м^2 Азовского моря в Керченский пролив за 1 сут, к удельной массе льда на южной границе Азовского моря m^*_0

прекращается. Это происходит вследствие образования плотного ледяного поля сплоченностью до 1,0, которое простирается от берегов о-ва Тузла на юге до мыса Еникале на севере и ограничивает поступление азовского льда в западную часть пролива. Отметим, что при продолжительном (от 3 сут и более) северном ветре ($W = 10 \text{ м/с}$) велика вероятность ледовых заторов во всей северной части Керченского пролива от его северной оконечности до о-ва Тузла, а также в районе Тузлинской дамбы, поскольку в результате выноса льда из Азовского моря вся она практически полностью покрывается льдом сплоченностью 1,0 (рис. 4, з).

На рис. 5 представлены зависимости, характеризующие интенсивность выноса льда из Азовского моря в Керченский пролив от скорости и направления ветра. Синяя, зеленая и красная линии соответствуют ветрам северного, северо-западного и северо-восточного направлений. На оси ординат отложены величины отношения массы m^* льда, поступившей в среднем с 1 м^2 Азовского моря в Керченский пролив за 1 сут, к поверхностной плотности массы льда на южной границе Азовского моря m^*_0 . Осреднение проводилось по первым 6 суткам дрейфа льда с момента начала действия ветра. Видно, что для всех трех кривых величина углового коэффициента наклона касательной в точке растет с увеличением скорости ветра. Наиболее интенсивный вынос массы льда из Азовского моря реализуется под действием северного ветра. При скорости ветра $W = 10 \text{ м/с}$ за сутки дрейфа, в среднем, на 1 м^2 площади Керченского пролива поступит около четверти массы льда, содержащейся на 1 м^2 акватории Азовского моря, непосредственно примыкающей к северной границе пролива. Для ветров СЗ и СВ направлений на всем интервале рассмотренных скоростей ветра величина отношения m^*/m^*_0 несколько меньшая, чем в случае северного ветра. Кроме того, при слабых ветрах (до 5 м/с) масса льда, выносимого СЗ и СВ ветрами примерно одинаковая с небольшим преобладанием при СЗ ветре. Однако при умеренном (от 5 до 10 м/с) СВ ветре

вынос массы льда из Азовского моря будет большим, чем при СЗ ветре такой же скорости.

Закключение. На основе численной реализации двумерной математической модели выполнено исследование выноса льда из Азовского моря в Керченский пролив под воздействием ветров северных румбов. Показано, что характер выносной адвекции льда существенно зависит от направления, а также от скорости и продолжительности действия ветра. При слабом СЗ ветре лед не проникает в пролив южнее оконечности косы Чушка, скапливаясь, преимущественно, вдоль ее западного побережья. Умеренный СЗ ветер вызывает дрейф льда в двух направлениях: к центральной части о-ва Тузла и на юго-восток в район между косой Тузла и г. Тамань. Со временем первый поток ослабевает и весь азовский лед дрейфует к северо-западному берегу Таманского полуострова. При СВ ветре лед дрейфует вдоль западного побережья северной узости, затем в сторону северо-западной части о-ва Тузла, а далее — через Павловскую узость в юго-западную часть пролива. Если действие ветра продолжительно, то дрейфующий лед может обогнуть мыс Такиль и выйти в Черное море.

Наиболее сложные ледовые условия, связанные в Керченском проливе с выносом льда из Азовского моря, реализуются под действием северного ветра. За несколько суток практически вся северная часть Керченского пролива от северной оконечности до о-ва Тузла, а также район между островом и дамбой покрываются льдом сплоченностью, близкой к единице. Под действием северного ветра реализуется наиболее интенсивный, по сравнению с ветрами СЗ и СВ направлений, вынос массы льда из Азовского моря. В этом случае азовский лед также может преодолеть весь Керченский пролив и попасть в Черное море. При слабых ветрах он огибает о-в Тузла только со стороны Тузлинской промоины, а при умеренных — еще и со стороны Павловской узости.

1. Крындин А.Н. Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и положения кромки льда на Черном и Азовском морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции // Тр. ГОИН. — 1964. — Вып. 76. — С. 7–77.
2. Синюрин Ю.Н. Торосистость плавающего льда в открытых частях Азовского моря // Метеорология и гидрология. — 1978. — № 3. — С. 99–103.
3. Куцуруба А.Н. Статистические характеристики сроков очищения ото льда и скорости таяния льда на Азовском море // Тр. Гидрометцентра СССР. — 1984. — Вып. 263. — С. 101–105.
4. Еремеев В.Н., Иванов В.А., Ильин Ю.П. Океанографические условия и экологические проблемы Керченского пролива // Мор. екол. журн. — 2003. — 2, № 3. — С. 27–40.
5. Боровская Р.В., Ломакин П.Д., Панов Б.Н., Спиридонова Е.О. Современное состояние ледовых условий в

- Азовском море и Керченском проливе на базе спутниковой информации / НАН Украины. Мор. гидрофиз. ин-т. — Препр. — Севастополь, 2008. — С. 42.
6. *Букатов А.Е., Моисеева Е.А.* Климатическая изменчивость ледового режима Азовского моря // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь: МГИ НАН Украины. — 2009. — С. 273–279.
 7. *Ильин Ю.П., Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Горбач С.Б.* Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1. Азовское море. — Севастополь, 2009. — 402 с.
 8. *Океанографічний атлас Чорного та Азовського морів* / Гол. ред. В.М. Єремєєв. — К. : Держгідрографія, 2009. — 356 с.
 9. *Букатов А.Е., Завьялов Д.Д., Соломаха Т.А.* Динамика распределения ледовитости и сплоченности плавающего льда в Азовском море // Экономическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. — Вып. 24. — С. 235–243.
 10. *Букатов А.Е., Завьялов Д.Д., Соломаха Т.А.* Динамика Азовского моря в ледовых условиях // Геоинформатика. — 2010. — № 2. — С. 54–60.
 11. *Ашик И.М.* Численный гидродинамический метод прогноза колебаний уровня моря в Финском заливе с учетом влияния ледяного покрова // Гидрометеорологический Центр России, Информационный сборник № 29 “Результаты испытания новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов”. — 2002. — С. 90–107.
 12. *Dukowicz J.K., John R. Baumgardner* Incremental Ramapping as a Transport / Advection Algorithm // J. Computational Physics. — 2000. — **160**. — P. 318–335.

*Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь, Украина*

Поступила в редакцию 05.09.2011 г.

О.Е. Букатов, Д.Д. Зав'ялов, Т.О. Соломаха

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИНЕСЕННЯ ЛЬОДУ З АЗОВСЬКОГО МОРЯ В КЕРЧЕНСЬКУ ПРОТОКУ

На основі математичної моделі спільної динаміки води і льоду виконано моделювання адвекції льоду з Азовського моря в Керченську протоку. Розглянуто залежність конфігурації та динаміки зон скупчення льоду, розподілу його концентрації в Керченській протоці від інтенсивності та тривалості дії вітру північних румбів.

Ключові слова: динаміка льодового покриву, дрейф льоду, Керченська протока.

A.E. Bukatov, D.D. Zav'yalov, T.A. Solomakha

NUMERICAL SIMULATION OF ICE TRANSPORT FROM THE AZOV SEA TO THE KERCH STRAIT

Numerical simulation of ice transport from the Azov Sea to the Kerch Strait is made on basis of a mathematical model of water and ice dynamics. Described in the paper is a relation between configuration and dynamics of ice accumulation, its concentration profile at the Kerch Strait and winds of the northern rhumbs.

Keywords: ice cover dynamics, ice drift, the Kerch Strait.