

УДК 551. 465

© П.Д. Ломакин, А.И. Чепыженко, А.А. Чепыженко, 2012

Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь

ДИНАМИКА ВОД И ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В РАЙОНЕ о. ТУЗЛА (Керченский пролив) ПРИ УСТОЙЧИВЫХ МЕРИДИОНАЛЬНЫХ ВЕТРАХ

На основе анализа данных трех комплексных океанологических экспедиций, проведенных МГИ НАНУ и ЮгНИРО, показано, что при типичных для Керченского пролива ветрах вызываемый ими в районе о. Тузла сгонно-нагонный эффект – один из значимых факторов, формирующих поля гидрофизических и геологических элементов на рассматриваемой акватории. Выявлены участки эрозии и аккумуляции взвеси в области о. Тузла и дамбы.

Введение. Сооруженная в 2003 г. дамба существенным образом отразилась на составляющих водной экосистемы Керченского пролива, в частности, на гидрофизических и литодинамических процессах. Наиболее ярко это проявилось на участках вокруг о. Тузла, где качественно изменилась циркуляция вод, интенсифицировались процессы деформации береговой линии и подводного склона острова [1-3].

Несмотря на то, что в настоящее время Керченский пролив, и особенно акватория вокруг о. Тузла, активно исследуются как на экспериментальном [1, 3], так и на теоретическом [2, 4] уровнях, процессы и механизмы, вызывающие локальную динамику вод и взвеси, а также формирующие здесь структуру гидрофизических полей, остаются недостаточно изученными. Это препятствует решению экологических, геологических, гидротехнических задач.

Цель предлагаемой статьи – выявить закономерности циркуляции вод, движения суммарного взвешенного в водной толще вещества, участков абразии и аккумуляции взвеси в области о. Тузла при типичных для Керченского пролива устойчивых ветрах северных и южных румбов.

Материал и методы. В качестве исходных данных выбраны материалы трех комплексных океанологических экспедиций, которые были выполнены в условиях действия достаточно продолжительных устойчивых ветров меридионального направления. Две из них были реализованы в условиях северо-восточного ветра и третья – при юг-юго-восточном ветре.

Съемки МГИ НАН Украины (г. Севастополь) 15 апреля 2009 г. и ЮгНИРО (г. Керчь) 24, 25 июля 2010 г. были проведены в условиях устойчивого северо-восточного ветра (рис. 1 а-г). В экспедиции МГИ была детально исследована акватория вокруг о. Тузла (рис. 1 а). Крупномасштабная съемка, выполненная ЮгНИРО, касалась большей части акватории пролива и участков побережья Тузлы (рис. 1 в). Обе экспедиции реализованы при сходных синоптических ситуациях, обусловивших над исследуемым регионом северо-восточный атмосферный перенос и, соответственно, генеральный

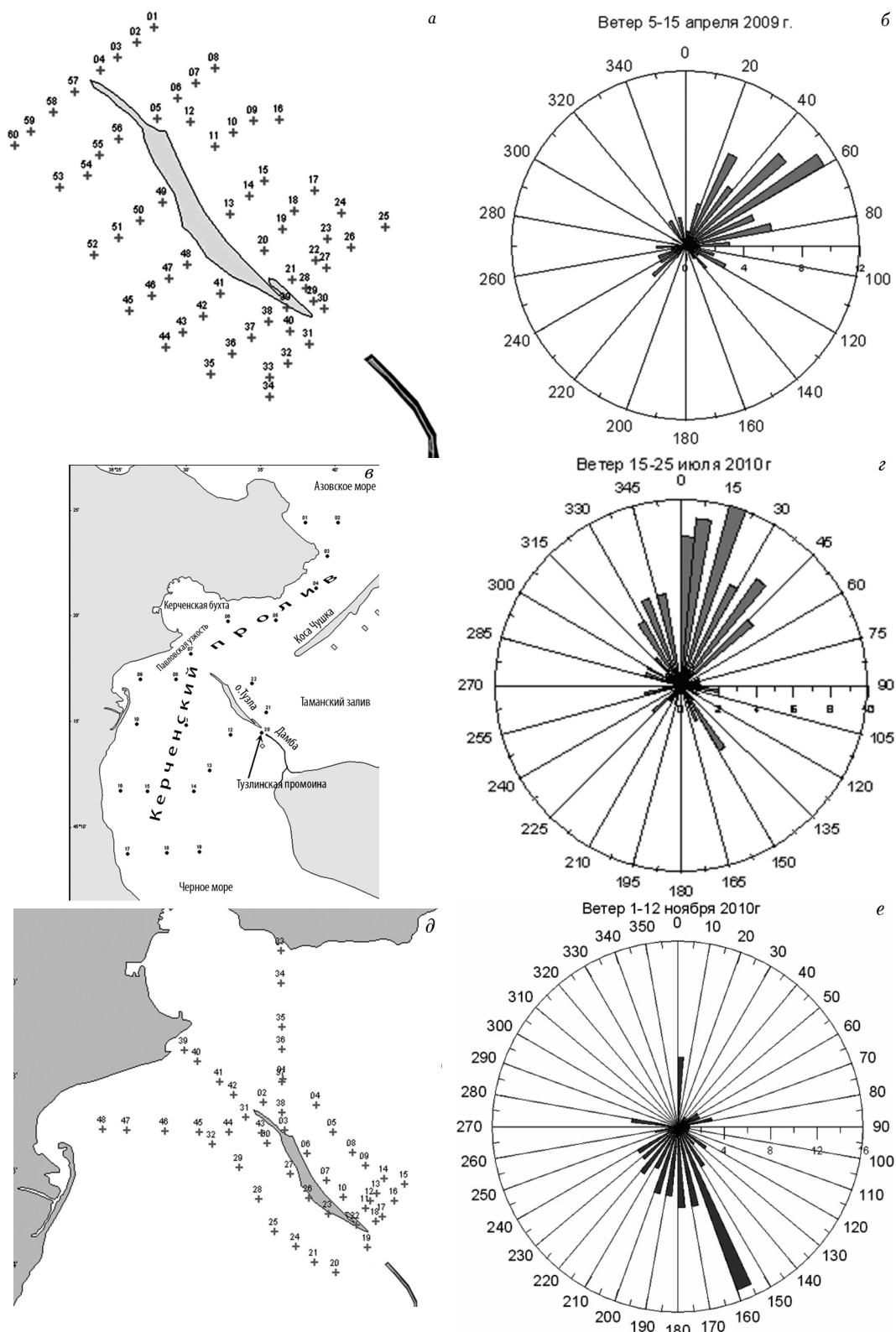


Рис. 1. Схемы станций и розы ветров для времени проведения экспедиций в Керченском проливе: МГИ НАНУ – апрель 2009 г. (а, б), ноябрь 2010 г. (д, е); ЮгНИРО – июль 2010 г. (в, г)

поток вод из Азовского моря в Черное. Во время обеих съемок, как и в предшествовавшие им 9-10 дней, над акваторией пролива наблюдался северо-восточный ветер со средней скоростью 7-10 м/с (рис. 1 б, г). Водная толща характеризовалась наличием вертикальной стратификации в полях температуры и солености. Аналогичные для обеих съемок фоновые условия в воздушной и водной средах позволяют объединить их результаты.

Съемка МГИ, проведенная 11–12 ноября 2010 г., отражала ситуацию, когда устойчивый ветер южной четверти сформировал в проливе генеральный перенос вод из Черного моря в Азовское. Съемка была начата на девятый день действия южного юго-восточного ветра со средней скоростью 6-12 м/с (рис. 1 д, е). Эта съемка выполнялась в наиболее сложных погодных условиях, когда порывы ветра достигали 15 м/с, а высота ветровых волн вдоль черноморского наветренного склона о. Тузла – 1,5-2,0 м. В прибрежной полосе вдоль таманского подветренного берега Тузлы ветровое волнение отсутствовало. Водная толща имела слабо выраженную плотностную стратификацию.

Работы проведены с борта маломерного судна при непосредственном участии авторов. На полигоне МГИ (вокруг Тузлы) станции выполнялись в дрейфе в диапазоне глубин 1-6 м. В третьей экспедиции в узкости между Тузлой и дамбой на 4-х станциях были выполнены измерения течений (рис. 1 д). На полигоне ЮгНИРО наблюдения за течениями проведены на всех станциях (рис. 1 в). Диапазон глубин на этом полигоне 4-16 м.

Массивы исходной информации получены при помощи биофизического комплекса «Кондор» [5]. Температура, соленость, суммарное взвешенное в водной толще вещество и растворенная органика фиксировались в зондирующем режиме с шагом по глубине 0,1 м. Течения измерялись при помощи портативного автономного регистратора, которым снабжен комплекс «Кондор», на горизонтах 0,5; 2; 4 м и у дна. Дискретность наблюдений за течениями – 20 с. Время экспозиции прибора на горизонтах каждой станции – 20-40 минут. Для анализа использованы векторы течений, средние по каждой из фактических реализаций.

Отметим, что для исследования системы течений была предпринята попытка использования буксируемой системы «ADCP». Однако, как показал опыт эксплуатации этого, наверное, самого совершенного в настоящее время измерителя течений, он оказался непригодным в условиях мелководья. В силу собственных конструктивных особенностей, «ADCP» не дает достоверную информацию о течениях в верхнем ~ 2 м слое и в слое такой же толщины у дна [6].

В связи с этим при анализе течений использованы только данные, полученные при помощи комплекса «Кондор», с привлечением косвенных методов анализа структуры термохалинного поля.

Структура мутьевых потоков в районе о. Тузла оценивалась по косвенным признакам на основе анализа составляющих трехмерного поля суммарного взвешенного вещества.

Обсуждение результатов. Согласно наиболее полным и емким экспериментальным исследованиям Керченского пролива, проведенным в 60-80-е годы прошлого столетия, которые обобщены в известной работе Э.Альтма-

на [7], основная роль в формировании поля течений в проливе принадлежит устойчивым меридиональным ветрам. Устойчивые ветры северной четверти вызывают в Керченском проливе продольный наклон уровня в сторону Черного моря. При этом возникает азовский тип циркуляции, повторяемость которого в течение года 47%. Устойчивые ветры южной четверти приводят к обратному эффекту, генерируя черноморский тип циркуляции с повторяемостью 38%. В трех основных узкостях Керченского пролива: Азовской, расположенной в северной его части; Павловской – у западной оконечности о. Тузла и Тузлинской промоине – у восточной оконечности о. Тузла (рис. 1 в) при этих ветровых условиях, в связи с локальной деформацией уровня, возникают сгонно-нагонные явления, формируется собственная система циркуляции, характеризующаяся наличием придонных противотечений.

Рассмотрим динамику вод и взвешенного вещества в условиях северо-восточного ветра, обуславливающего перенос вод из Азовского моря в Черное. Этот ветер преобладает над проливом в течение всего года. Его повторяемость на годовом масштабе максимальна и равна 22%, а в осенние месяцы достигает 35% [2, 8].

Для представления условий формирования локальной динамики вод в районе о. Тузла, описание полученных результатов целесообразно начать с анализа крупномасштабной системы течений в проливе, вызываемой устойчивым северо-восточным ветром (рис. 1 в, г).

В ходе съемки ЮгНИРО в верхнем слое пролива зафиксирован поток азовоморских вод, который, следуя Азовской узкостью, обтекал берег Керченской бухты. Южнее Павловской узкости этот поток разделялся на две ветви. Одна (меридиональная), прижимаясь к западному берегу пролива, распространялась в Черное море. Другая (зональная) ветвь разворачивалась к востоку, разделяясь на две составляющих. Одна из них, проникающая в узкость между Тузлой и дамбой, омывала остров по циклонической траектории. Другая, более мощная, формировала в южной части пролива антициклональную циркуляционную ячейку (рис. 2 а).

В срединном и придонном слоях на преобладающей части акватории наблюдалось компенсационное течение, ориентированное противоположно направлению течения в верхнем слое вод (рис. 2 б-г).

Рассмотрим более детально циркуляцию вод в районе о. Тузла. Как уже упоминалось, вокруг острова отмечалась циклоническая циркуляция. В верхнем метровом слое течение имело хорошо выраженную вдольбереговую составляющую. На южном подводном склоне о. Тузла вектор скорости с глубиной разворачивался влево по нормали к берегу, что может быть следствием эффекта ветрового сгона. Напомним, что данный участок (при анализированном направлении ветра) расположен с подветренной стороны острова. Вдоль северо-восточного склона Тузлы в срединном слое и у дна течение имело составляющую, направленную в Таманский залив, что свидетельствует о процессе размыва данного участка. Отток вод у дна из прибрежной области здесь вероятно связан с ветровым нагоном, возникшим вдоль северного побережья Тузлы при северо-восточном ветре (рис. 2).

Аналогичная описанной выше ситуация в районе о. Тузла была зафиксирована в апреле 2009 г. в ходе съемки МГИ (см. рис. 1 а, б). Отсутствие

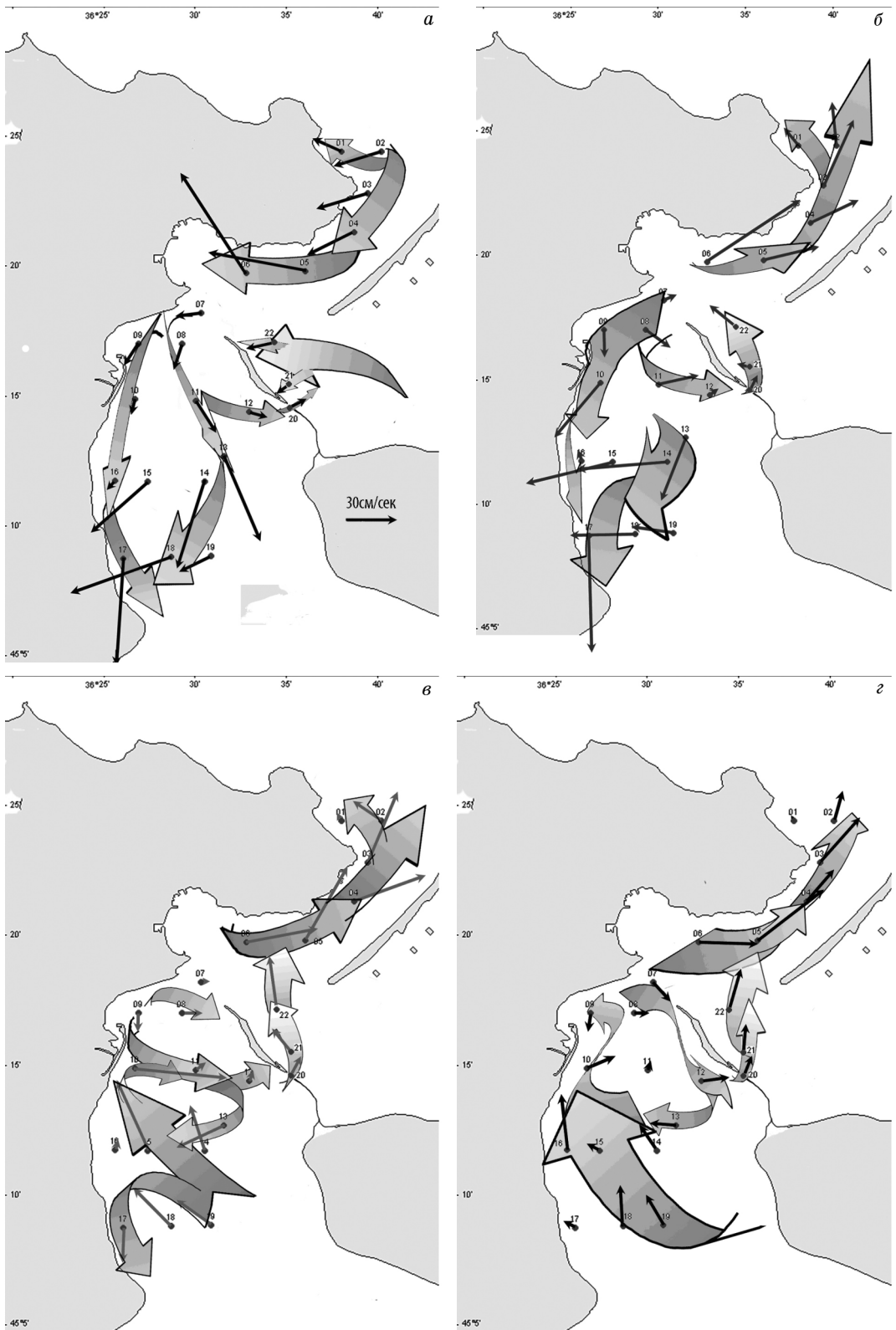


Рис. 2. Векторы течений и циркуляция вод в Керченском проливе в июле 2010 г.: а – верхний слой, б – горизонт 2 м, в – горизонт 4 м, г – придонный горизонт

прямых измерений течений в данном случае затруднило интерпретацию динамических процессов. Детальная схема станций и трехмерное поле взвеси с хорошим разрешением по вертикали позволили выйти на структуру мутьевых потоков и возможный механизм, обусловивший локальную динамику вод и взвешенного вещества.

В результате выяснено, что, как и в предыдущем случае, вокруг острова в верхнем слое наблюдалась ветровая циклоническая циркуляция вод и компенсационные течения в придонном слое. То есть в анализируемом случае также были очевидными признаки сгонно-нагонных явлений.

Анализ трехмерного поля взвеси вокруг о. Тузла, проведенный нами по данным экспедиции МГИ НАН Украины в апреле 2009 г. (рис. 3), свидетельствует о следующем.

В северной части пролива и в Таманском заливе наблюдались воды с высоким содержанием взвеси. Южнее Тузлы преобладали черноморские воды с минимальной концентрацией суммарного взвешенного в воде вещества (рис. 3 а, б). Содержание взвеси между соответствующими участками различалось на порядок.

На рис. 3 в и рис. 3 г, где о. Тузла развернут соответственно своей восточной и западной оконечностями по нормали к их, рисункам, плоскости, построены траектории мутьевых потоков. Здесь стрелки белого цвета соответствуют черноморским водам с минимальной концентрацией взвеси 3-10 мг/л. Стрелки серого цвета – мутьевые потоки срединного слоя вод с содержанием взвеси 10-20 мг/л и черные стрелки – придонные потоки с максимальной концентрацией взвешенного вещества 20-30 мг/л.

Видна трехслойная структура мутьевых потоков. Их вертикальный масштаб – от нескольких дециметров до одного метра. В верхнем слое черноморские воды с минимальным содержанием суммарного взвешенного вещества (белая стрелка) по циклонической траектории обтекали восточную часть острова. В Таманском заливе вдоль северного склона острова эта струя с минимальной концентрацией взвеси опускалась на дно и далее, следуя к проходу между косой Чушка и о. Тузла, вновь выходила на поверхность. Отток взвеси от восточной оконечности Тузлы, направленный в Таманский залив, в системе мутьевых потоков происходил как в срединном (стрелки серого цвета), так и в придонном (черные стрелки) слоях (рис. 3 в). То есть, в данной ситуации преобладали процессы, вызывавшие эрозию берега и подводного склона восточной оконечности Тузлы, сопровождавшиеся выносом взвешенного вещества в Таманский залив.

Рассмотренный эффект подтверждается результатом геологических экспериментальных исследований [8], проведенных российскими авторами в районе дамбы. Согласно цитируемой работе, при северо-восточном ветре, как и в нашем случае, происходит размыв восточной оконечности Тузлы. Образовавшаяся при этом взвесь аккумулируется у дамбы. Основным источником поступления осадочного материала в береговую зону дамбы, помимо песков из береговых обрывов и ракуши, служит материал размыва о. Тузла.

Возможно, что выносимая в Таманский залив из зоны размыва восточного края о. Тузла взвесь также стала причиной существенных изменений рельефа дна. В районе промоины и к северу от нее за время 2008-2010 гг.

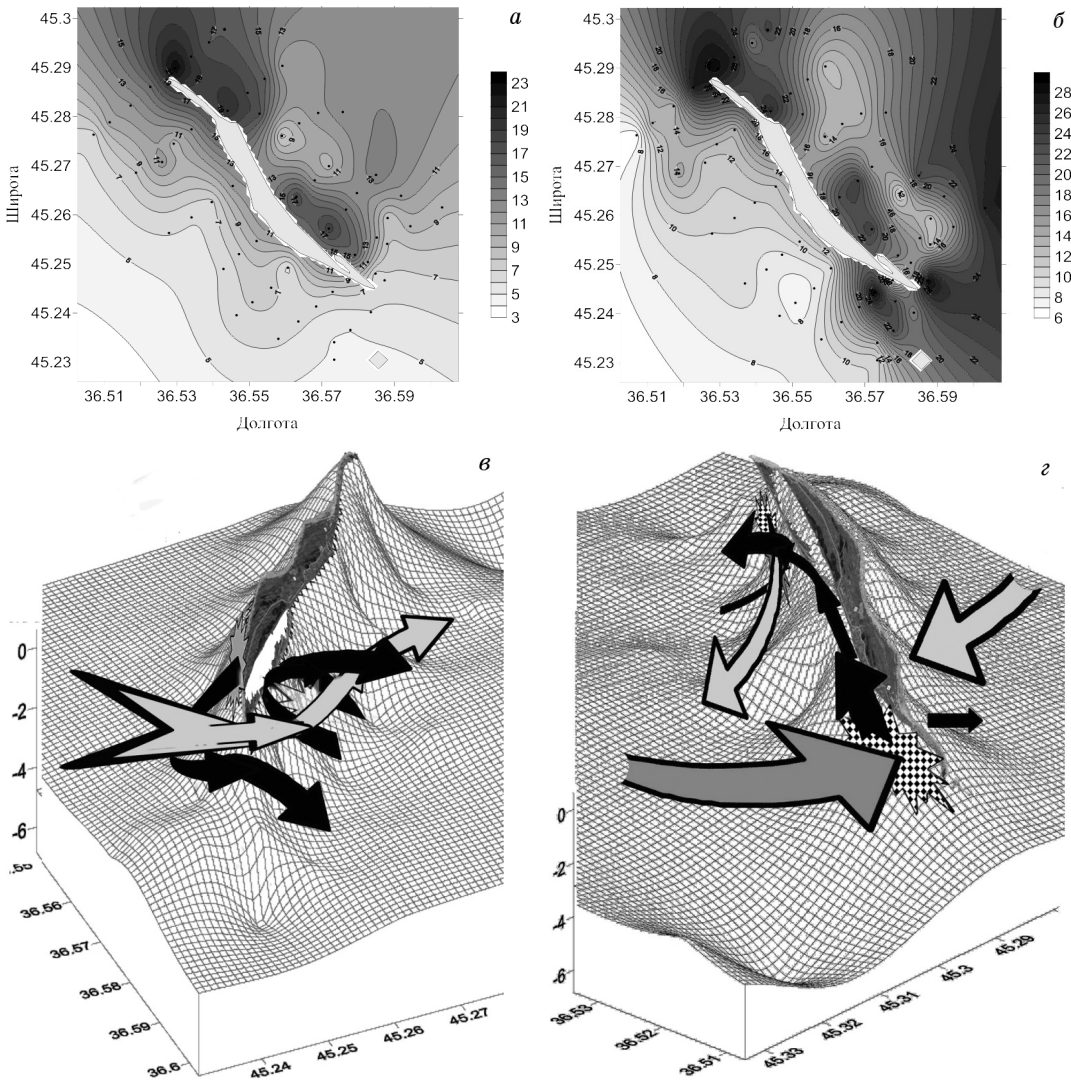


Рис. 3. Распределение взвеси (мг/л) в верхнем (а) и в придонном (б) слоях; схема мутьевых потоков у восточной (в) и у западной (г) оконечностей о. Тузла в апреле 2009 г.

повсеместно уменьшились глубины. По всей этой акватории и, особенно, вдоль дуги, представляющей собой мористое продолжение дамбы, появились многочисленные отмели. Некоторые из них в течение двух последних лет стали устойчиво выступать из воды.

У западного края Тузлы (рис. 3 г) наблюдалась конвергенция мутьевых потоков, которые поступали сюда со стороны Черного и Азовского морей, формируя локальную циклоническую вихревую ячейку. В результате непосредственно у западного края острова внутри этой ячейки у дна наблюдалось обособленное плотное скопление взвеси (рис. 3 г). Здесь преобладали процессы ее аккумуляции.

В придонном слое вдоль северного склона Тузлы отмечен поток взвешенного вещества, направленный на восток. У северо-восточного побережья острова он отклонялся к северу в Таманский залив. Возможно, что один из

источников, подпитывающих этот поток, связан со взвесью, аккумулирующей у западной оконечности Тузлы (рис. 3 г).

Сопоставление результатов двух анализируемых экспедиций, иллюстрируемых на рис. 2 и 3, выявляет хорошее сходство показателей локальной динамики вод и структуры поля взвеси в районах восточной и западной оконечностей о. Тузла. Это дает основание полагать, что типичные для Керченского пролива, наиболее часто повторяющиеся северо-восточные ветры генерируют вокруг Тузлы локальную систему течений, которая способствует размыву его восточной оконечности. При этом на участках, примыкающих к западной оконечности Тузлы, преобладает механизм, аккумулирующий взвесь.

Рассмотрим гидрофизические условия в районе о. Тузла при устойчивом юго-восточном ветре по данным съемки МГИ в ноябре 2010 г. (рис. 4).

Вертикальная стратификация термохалинного поля была типичной для начала холодного сезона. На большинстве станций температура и соленость незначительно изменялись с глубиной. В узкости между Тузлой и дамбой водная толща отличалась, практически, полной однородностью по вертикали, что свидетельствует об активном процессе турбулентного обмена на данном участке акватории.

Горизонтальная структура полей температуры и солености была достаточно хорошо выраженной (рис. 4), что позволило использовать соответствующие распределения в качестве косвенных показателей динамики вод.

Так, на рис. 4 отчетливо видно, что от юго-востока на рассматриваемую акваторию распространялись черноморские воды с температурой 14,7-15,0°C и соленостью 17,93-17,95 ЕПС. Часть этих вод проникала в промоину. Другая часть, возможно, в виде прибрежной струи, обтекала остров по антициклональной траектории. В эту циркуляцию втягивались более холодные и менее соленые воды из центральной части Керченского пролива. Так, температура и соленость вдоль северного берега Тузлы соответственно равнялись 14,2-14,3°C и 17,75-17,85 ЕПС. В районе западной оконечности Тузлы находилась отдельная замкнутая антициклональная вихревая ячейка.

Интересна структура течений в Тузлинской промоине (рис. 5). Здесь на спутниковом снимке показаны векторы течения, измеренные на 4 станциях, контур восточной оконечности о. Тузла до строительства дамбы и его нынешнее очертание, а также дамба. Пунктирные стрелки обозначают течение на поверхности; серые и черные, соответственно, – в срединном и придонном слоях. Видно, что в верхнем слое течение имело скорость 15-20 см/с. Векторы течений здесь разнонаправлены. Хотя в определенном приближении их совокупность можно интерпретировать как антициклональное вихревое образование. Совершенно другая кинематическая ситуация наблюдалась в срединном и придонном слоях, где на всех четырех станциях зафиксирован единый поток. Его скорость по сравнению с верхним слоем возрастала, примерно, в два раза, а направление имело ярко выраженную составляющую на юг.

Поле суммарного взвешенного в водной толще вещества характеризовалось наличием двух максимумов: в промоине со значениями 13,6-14,5 мг/л и у западной оконечности Тузлы – 8,5-9,1 мг/л (рис. 4 в, е).

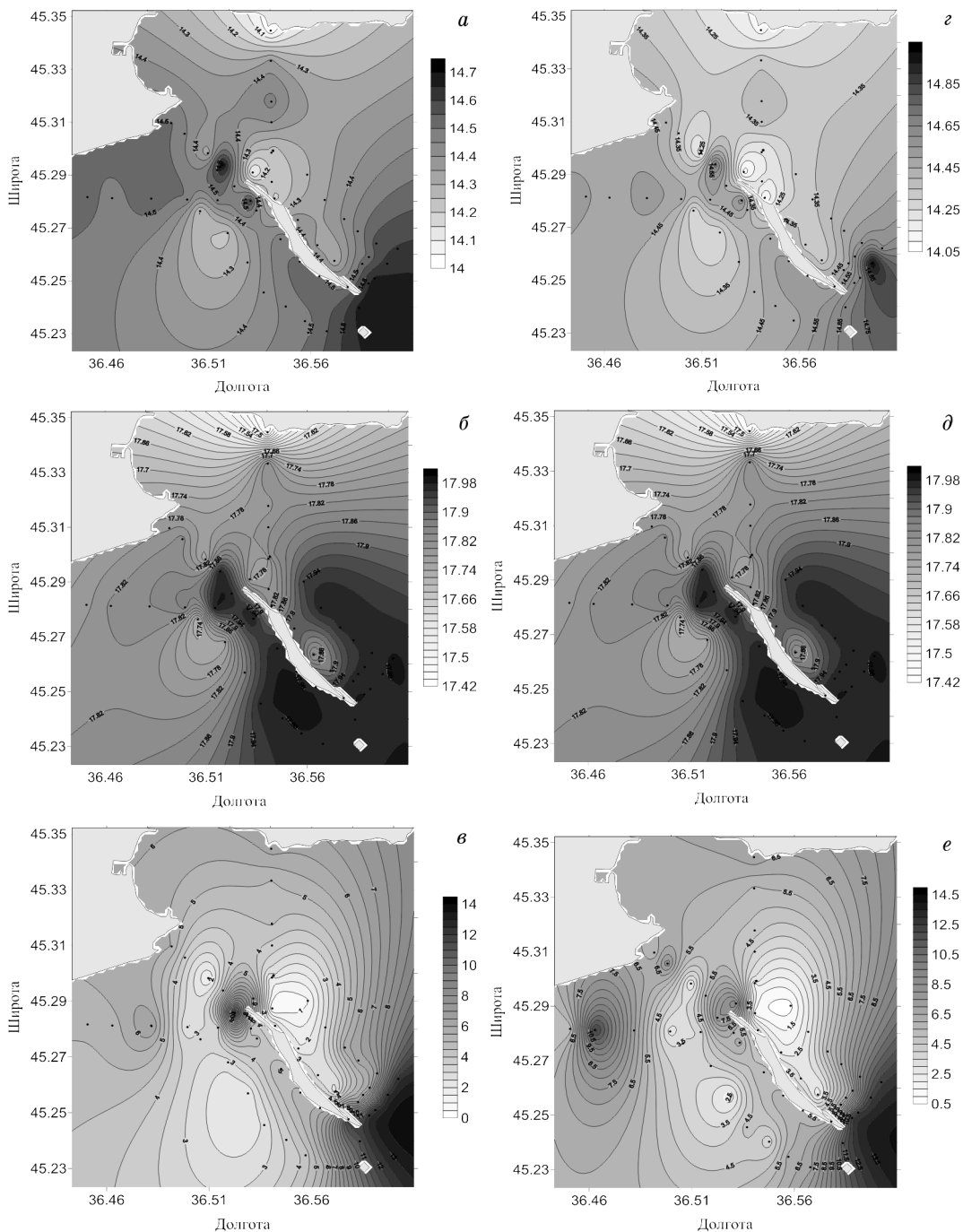


Рис. 4. Распределение температуры (°C), солёности (ЕПС), суммарного взвешенного вещества (мг/л) на поверхности (а, б, в, соответственно) и те же параметры у дна (г, д, е, соответственно) в ноябре 2010 г.

Судя по направлению придонного потока вод в промоине (рис. 5), взвесь выносилась к югу частично в черноморскую часть пролива, частично аккумуляровалась на таманском склоне дамбы. Развитое южное течение у дна способствовало размыву восточной оконечности Тузлы.

Рис. 5. Векторы течения в тузлинской промоине в ноябре 2010 г.

У западной оконечности о. Тузла наблюдалась область аккумуляции взвеси в системе антициклонального вихревого образования (рис. 4 в, е).

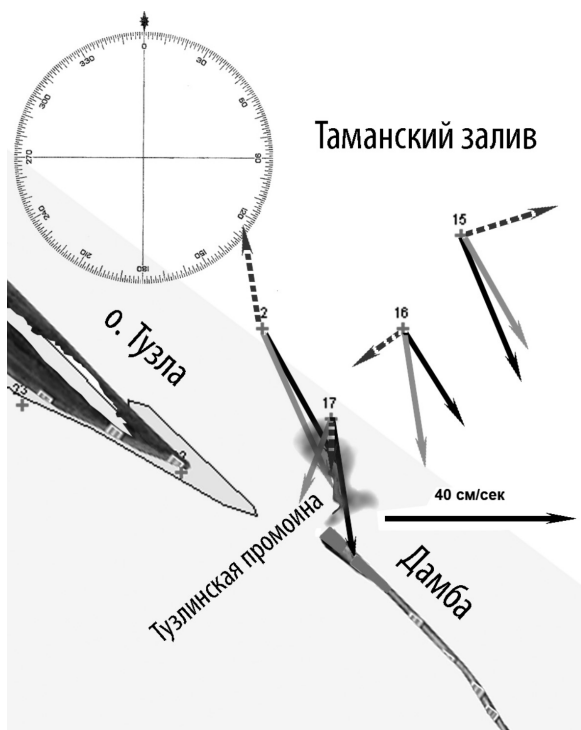
Представленный выше анализ эмпирических данных, как и в случае северо-восточного ветра, обнаружил ряд явных признаков, типичных для сгонно-нагонного механизма. Ветер южной четверти, имея нормальную составляющую к зонально ориентированной морфометрической системе «Тузла+дамба», вызвал нагон на ее черноморском склоне и сгон – на таманском.

Сгонно-нагонные явления в Керченском проливе также наблюдались и до строительства дамбы. Для пролива в целом они достаточно хорошо исследованы, хотя их локальные проявления на отдельных участках более или менее детально не рассматривались [7].

Построенная в 2003 г. дамба существенно сузила Тузлинскую промоину. Возникшее крупномасштабное (в рамках пролива) полуискусственное морфометрическое образование «Тузла+дамба», перекрывшее большую часть Керченского пролива (практически на три четверти, рис. 1 в) и превращавшее на значительном расстоянии разгон меридиональных ветров, способствовало развитию (или интенсификации) на его берегах сгонно-нагонных явлений. В результате в области Тузлы, и особенно в промоине, активизировались динамические процессы.

Как показано выше, в верхнем слое вод вокруг острова при устойчивых ветрах северной четверти устанавливается циклоническая циркуляция и антициклональная – при устойчивых южных ветрах. При этом течения у дна имеют меридиональную составляющую.

Генерируемые меридиональными ветрами мощные компенсационные течения в придонном слое промоины способствуют размыву участков восточной оконечности о. Тузла. При ветрах северной четверти наблюдается отток взвеси из этих участков в Таманский залив, где она осаждается у берега дамбы, в промоине и в области, находящейся севернее промоины. Устойчивые ветры южной четверти вызывают в промоине придонные компенсационные течения, направленные к югу. При этом, как и в случае северных ветров, размываются участки у восточной оконечности Тузлы, откуда взвесь в системе мутьевых потоков частично выносится в черноморскую часть пролива и частично оседает на таманском склоне дамбы.



У западной оконечности о. Тузла меридиональные устойчивые ветры, независимо от их направления, способствуют формированию вихревой циркуляционной ячейки, которая аккумулирует взвесь.

Согласно [7], ситуации, когда над Керченским проливом преобладают зональные независимо от их силы ветры, неустойчивые меридиональные ветры, маловетрие и штили, сопровождаются низкой динамической активностью вод. В связи с этим можно считать, что подобные ветровые условия благоприятствуют осаждению взвешенного вещества в донные отложения.

Изложенные в настоящей статье результаты исследований, касающиеся мест расположения основных участков абразии и аккумуляции взвеси в районе о. Тузла, подтверждают данные геологических [2, 8] и космических [9] исследований.

Заключение. Выявленные особенности циркуляции вокруг о. Тузла в условиях устойчивых ветров северной и южной четверти позволяют утверждать, что локальная динамика вод и взвеси здесь в существенной мере определяется сгонно-нагонными явлениями, которые, вероятно, были менее значимыми до сооружения дамбы. Морфометрическая зонально ориентированная система «о. Тузла+дамба» стала препятствием для разгона меридиональных ветров на значительном расстоянии. Вдоль наветренного склона этой системы меридиональные ветры формируют нагонные явления и сгонные – вдоль подветренного. В срединном слое и у дна возникают компенсационные течения, способствующие оттоку взвешенного вещества. Наиболее мощные течения и мутьевые потоки наблюдаются в придонном слое вод тузлинской промоины.

При устойчивых ветрах северной четверти в верхнем слое вод вокруг острова устанавливается циклоническая циркуляция и антициклональная – при устойчивых южных ветрах. При этом течения у дна имеют меридиональную составляющую.

Генерируемые меридиональными ветрами мощные компенсационные течения в придонном слое промоины способствуют размыву участков восточной оконечности о. Тузла. При ветрах северной четверти наблюдается отток взвеси из этих участков в Таманский залив, где она осаждается у берега дамбы и севернее промоины. Устойчивые ветры южной четверти вызывают в промоине придонные компенсационные течения, направленные к югу. В этой ситуации, как и в случае северных ветров, размываются участки у восточной оконечности Тузлы, откуда взвесь в системе мутьевых потоков оседает на таманском склоне дамбы.

У западной оконечности о. Тузла меридиональные устойчивые ветры, независимо от их направления, содействуют формированию вихревой циркуляционной ячейки, которая аккумулирует взвесь.

При неустойчивых над проливом меридиональных ветрах, зональных ветрах, маловетрии и штилях в исследуемом районе формируются условия, способствующие осаждению взвешенного вещества.

1. *Брянцев В.А.* Возможные экологические последствия сооружения Тузлинской дамбы (Керченский пролив) // Морской экологический журнал. – 2005. – 4, №1. – С. 47-50.

2. *Иванов В.А.* Проведение научно-исследовательских работ и осуществление математического моделирования и прогнозирования основных гидрометеорологических процессов в районе Керченского пролива. Отчет (первый этап). - Севастополь, – МГИ НАН Украины. – 225 с.
3. *Ломакин П.Д., Спиридонова Е.О.* Природные и антропогенные изменения в полях важнейших абиотических элементов экологического комплекса Керченского пролива в течение двух последних десятилетий // Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – 118 с.
4. *Моделирование* динамики вод в Керченском проливе и предпроливных зонах. Под ред. *Иванова В.А.* // Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – 205 с.
5. <http://www.dent-s.narod.ru/kondor.html>.
6. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Иванов В.А., Шутов С.А., Зима В.В.* Течения в Керченском проливе по данным *адср* наблюдений 2008-2009 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – Выпуск 22. – С. 253-267.
7. *Альтман Э.Н.* Динамика вод Керченского пролива // В кн. Гидрометеорология и гидрология морей СССР. Проект “Моря СССР”. – Том 4. – Черное море. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1991. – С. 291-328.
8. http://student.km.ru/ref_show_frame.asp?id=159FACEDD4BA46A7AEC5D9F416DEE764.
9. *Степняк Ю.Д., Башкирцева Е.В.* Морфология и литодинамика о. Коса Тузла по данным дистанционных наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. ЭКОСИ-Гидрофизика, Выпуск 20. Севастополь, 2009. – С. 100-107.

На основі аналізу даних трьох комплексних океанологічних експедицій, проведених МГІ НАНУ та ПівденНІРО показано, що при типових для Керченської протоки вітрах, викликаний ними згонно-нагонний ефект в районі о. Тузла – один з значущих чинників, що формують поля гідрофізичних та геологічних елементів на даній акваторії. Виявлені ділянки ерозії та аккумуляції завислої речовини в області о. Тузли та дамби.

On the base of three complex oceanologic expeditions, obtained by Marine hydro physical institute of the National academy of science of Ukraine and the Southern scientific research institute of marine fisheries & oceanography, it was shown that on and away water-coming effect, caused by typical for the Kerchenskiy strait winds, in Tuzla Island region is one of the significant factors of forming the hydrophysical and geological elements' fields on the considered area of water. The erosion areas and the zones of the TSM accumulation were revealed in the area near Tuzla Island and the dam.

Получено 12.04.2011 г.