

УДК 551.465.4

Ю.С. Тучковенко, д.геогр.н., Д.В. Кушнір, інж.

Одесский государственный экологический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД В ТИЛИГУЛЬСКОМ ЛИМАНЕ

Приведены результаты расчетов и анализа трехмерной ветровой циркуляции вод на акватории Тилигульского лимана при стационарных ветрах различных направлений. Расчеты выполнены с использованием гидродинамической модели Delft3D-FLOW на криволинейной расчетной сетке.

Ключевые слова: Северо-западное Причерноморье, Тилигульский лиман, динамика вод, моделирование.

Введение. Тилигульский лиман расположен на украинской части побережья северо-западной части Черного моря, в 60 км от г.Одессы на границе Одесской и Николаевской областей (46° 39,3' - 47° 05,3' с.ш., 30°57,3' - 31°12,7' в.д.). Лиман представляет собой затопленную морскими водами долину р.Тилигул и вытянут субмеридионально с северо-северо-запада на юго-юго-восток. В настоящее время его длина составляет 45-52 км, ширина изменяется на отдельных участках от 1 до 4,5 км. При отметке уровня воды в лимане -0,4 м БС (метров в Балтийской системе высот и глубин) площадь зеркала его водной поверхности составляет 129 млн. м², объем вод – 693 млн. м³. Южная и центральная части лагуны представляют собой котловины с преобладающими глубинами в диапазоне 10-16 м, разделенные мелководной перемычкой (рис. 1а). Максимальная глубина в южной части лагуны достигает 22 м. Северная часть лагуны, в которую впадает р.Тилигул, мелководная, с глубинами менее 4 м. Средняя глубина лимана составляет около 5 м.

В настоящее время в результате антропогенной деятельности на водосборном бассейне Тилигульского лимана и климатических изменений, существенно уменьшился боковой поверхностный приток пресных вод в лиман, следствием чего является осолонение и обмеление лимана, увеличение концентрации биогенных веществ и темпов продуцирования органического вещества автотрофами. Последующее отмирание и биохимическое разложение органического вещества водорослей способствует развитию дефицита содержания кислорода в воде, гибели гидробионтов, обеднению биоразнообразия водной флоры и фауны. Складываются неблагоприятные условия для рыболовства, рекреации и туризма [1]. Например, летом 2010 г. из-за аномальных погодных условий: сильные ливни в июне-июле и аномально высокая температура воды в июле-августе, – наблюдалась массовая гибель рыбы (бычков, глоссы). На отдельных участках побережья было обнаружено 20 кг мертвой рыбы на квадратный метр. В разных районах лимана локальные заморы рыб наблюдались также летом 1999, 2000, 2001, 2006, 2007, 2013 гг.

Для поиска путей улучшения гидроэкологического режима Тилигульского лимана необходимо знать особенности циркуляции вод на его акватории, которая определяет водо- и массообмен между отдельными частями лимана. Доминирующее влияние на формирование циркуляции вод в лимане оказывает ветровое воздействие. Измерения течений в Тилигульском лимане, выполненные с 1979 по 1988 г., показали, что поля ветровых течений имеют исключительно сложный характер [2]. Попытки получить на основе натуральных инструментальных наблюдений детальную картину течений в лимане при стабильных ветрах не дали положительных результатов. Поэтому

для получения цельной картины баротропных ветровых течений в лимане В.М. Тимченко [2, 3] была использована диагностическая гидродинамическая модель А.И. Фельзенбаума [4]. Позднее, авторами [5], с помощью модифицированного варианта имитационной гидродинамической модели МЕССА была рассчитана трехмерная структура ветровых течений в лимане при стационарных ветрах различных направлений. Модель МЕССА (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment) реализована в σ -системе координат по вертикали, однако в горизонтальной плоскости используется обычная равномерная пространственная расчетная сетка [6]. Последнее свойство модели не позволяет детально описать пространственную структуру ветровых течений в области достаточно узкого прибрежного мелководья, с учетом сложной конфигурации береговой линии и рельефа дна. Этому недостатка лишены современные гидродинамические модели, реализованные в криволинейной, неравномерной в горизонтальной плоскости системе координат. К числу таких моделей относится Delft3D-FLOW [7].

Цель данной работы заключается в представлении результатов моделирования ветровой циркуляции вод в Тилигульском лимане, с детальным разрешением пространственной структуры течений, полученных с использованием гидродинамической модели Delft3D-FLOW.

Описание используемой модели. Подробное описание имитационной гидродинамической модели Delft3D-FLOW приведено в руководстве по ее использованию [8]. Использовался 3-D пространственный вариант модели. Модель базируется на численном решении уравнения Навье – Стокса для несжимаемой жидкости на мелкой воде в приближении Буссинеска. Для уравнения скорости вертикального движения принимается гидростатическое приближение. Вертикальные компоненты скорости течений рассчитываются через уравнение неразрывности. Перенос веществ и тепла в 3-D системе координат моделируется с помощью уравнения адвекции-диффузии, в которое также включены члены источников и стоков, для учета потоков массы и тепла.

Конечно-разностная аппроксимация уравнений модели выполняется на C-сетке Аракавы: скалярные величины задаются в центрах элементарной расчетной ячейки, а нормальные компоненты скорости – на соответствующих ее гранях. Для дискретизации гидродинамических уравнений модели в 3-D пространстве, по горизонтали используется структурированная ортогональная криволинейная система координат, а по вертикали – σ -система координат (хотя имеется возможность использования прямоугольной z – системы).

Акватория Тилигульского лимана покрывалась специально сгенерированной криволинейной расчетной сеткой, состоящей из 226×52 расчетных ячеек с 15 расчетными уровнями по вертикали в σ -системе координат. Размеры расчетных ячеек изменяются плавно вдоль продольной оси лимана в пределах от 100 до 450 м и от 75 до 320 м – в поперечном направлении (рис. 1б). Сетка точно описывает основные особенности геоморфологического строения лимана: конфигурацию его берегов, распределение глубин. Ортогональность горизонтальной криволинейной расчетной сетки не превышает 0,01 внутри вычислительной области. На границах расчетной сетки максимальные значения косинусов углов не превышают 0,08.

На основании критерия Куранта был определен временной шаг решения уравнений модели, который при моделировании принимался равным 60 с.

Исходные данные. В работе используется уточненная по сравнению с [5], батиметрическая карта Тилигульского лимана (рис. 1а), построенная доц. Грибом О.Н. на основе обобщения данных промерных работ, выполненных осенью 2010 и 2012 гг.

с помощью электронного эхолота Fishfinder-250 (Garmin). Позиционирование на местности осуществлялось с использованием навигатора GPS-72 (Garmin).

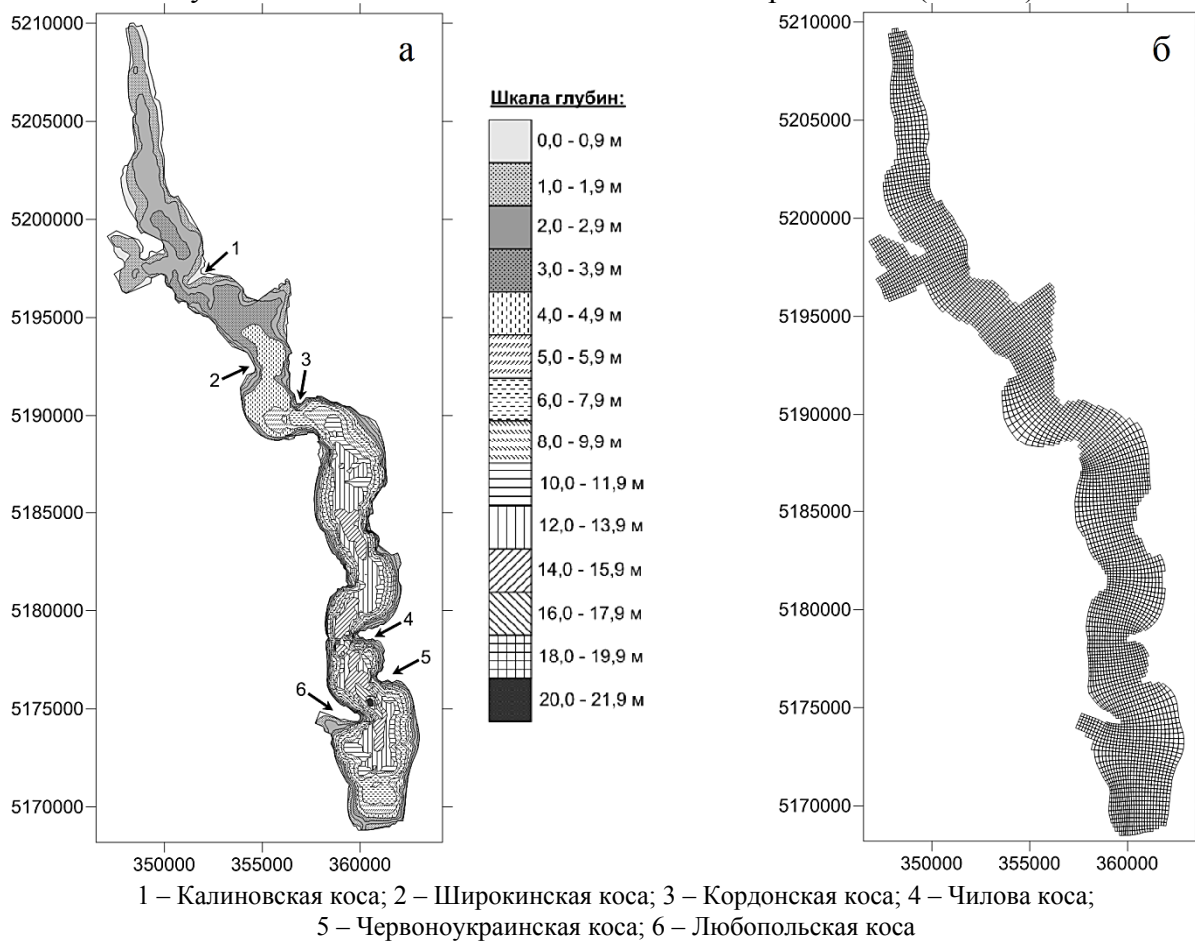


Рис. 1 – Батиметрическая карта Тилигульського лимана с глубинами, соответствующими уровню моря минус 0,4 м БС (а)*. Горизонтальная криволинейная расчетная сетка акватории Тилигульського лимана (б).

*На осях координат указаны отметки СУПМ (сетки по универсальной поперечной проекции Меркатора) с шагом 5000 м, зона 36

Расчеты ветровой циркуляции вод проводились при стационарных ветрах скоростью 5 м/с доминирующих (по повторяемости) направлений. По данным многолетних наблюдений на береговых гидрометеорологических станциях в портах Одесса, Южный, Очаков, доминирующими являются ветры С (повторяемость 15-33 %) и Ю (14-22 %) направлений [9]. Значительная повторяемость западных ветров (около 15 %) отмечается на станциях Одесса и Очаков. Ветровые условия в открытой части северо-западного шельфа Черного моря характеризуются преобладанием ветров С и СВ направлений [9].

Расчеты установившейся ветровой циркуляции вод для каждого направления ветра выполнялись на протяжении 10 сут модельного времени. Водообмен лимана с морем через соединительный канал не учитывался.

Обсуждение результатов моделирования. Расчеты ветровой циркуляции вод в Тилигульському лимане показали, что из-за вытянутости лимана в меридиональном направлении, значительной изрезанности береговой линии и изменчивости пространственной ориентации различных ее участков, пространственная структура течений зависит от направления ветра. При продольных по отношению к меридиональной оси лимана ветрах (северном и южном) имеет место интенсификация

направленных по ветру потоков в прибрежных, относительно мелководных областях (рис. 2). Вдоль продольной осевой линии лимана, которой соответствуют максимальные в каждой части лимана глубины, формируются придонные градиентные противотечения, генеральное направление которых противоположно ветру. Эти придонные компенсационные противотечения существенно влияют на поверхностные дрейфовые течения, ослабляя их. При этом вектора дрейфовых течений отклоняются вправо от направления ветра на угол до 90° . Обращает на себя внимание, что вдольбереговой поток у западного берега центральной и южной частей лимана более интенсивен, чем у восточного берега. Эта особенность наблюдается как при северных, так и при южных ветрах. Объясняется она особенностями конфигурации береговой линии и распределением глубин вдоль соответствующих границ лимана.

При поперечных по отношению к оси лимана ветрах (западном и восточном) пространственная структура ветровых течений приобретает еще более сложный и менее предсказуемый характер, чем при продольных. Продемонстрируем это на примере западного ветра (рис. 3). В целом, генеральное направление переноса вод в поверхностном слое совпадает с направлением ветра (направлено от западного берега лимана к восточному). Вдоль наветренного, западного берега лимана образуются отчетливо выраженные зоны дивергенции и конвергенции поверхностных дрейфовых течений. Зоны дивергенции соответствуют участкам прибрежной зоны, где береговая линия «вогнута» в западном направлении (заливам), а зоны дивергенции – «выпуклостям» береговой линии в восточном направлении (мысам-косам). В открытой, глубокой части акватории лимана, ориентированной вдоль его продольной оси, дрейфовые поверхностные течения более интенсивны, чем в случае продольных ветров; поскольку они в меньшей мере ослабляются придонными компенсационными течениями, которые при поперечных ветрах менее интенсивны, чем при продольных, и на отдельных участках имеют значительную меридиональную составляющую.

Северо-восточный ветер является поперечным для северной части лимана (выше Широкинской косы) и имеет как продольную, так и поперечную составляющие вектора скорости ветра для центральной и южной частей. Однако по величине эти составляющие меньше, чем в рассмотренных выше случаях северного и западного ветров. Из рис. 4 видно, что протяженные, однонаправленные по глубине вдольбереговые потоки развиваются в верховье лимана, а также вдоль западного берега центральной части лимана (от Марьяновского залива до Любопольской косы). Вдоль восточного берега центральной и южной частей лимана, а также возле Любополя (западное побережье), вдольбереговой поток разрывается в районах мысов - кос и не является непрерывным потоком. Хорошо выраженные зоны дивергенции поверхностных течений отмечаются в районах участков восточного побережья, которые представляют собой вогнутости береговой линии (заливы), ориентированные противоположно направлению ветра (Царегский и Кефальный заливы, залив юго-западнее Червоноукраинской косы). В открытой части акватории лимана поверхностные течения направлены по ветру: от восточного берега к западному. В придонном слое компенсационный градиентный поток меридиональной направленности также разрывается на части поперечными придонными течениями, направленными на запад, для компенсации оттока воды в зонах дивергенции течений.

Отдельно следует остановиться на анализе пространственной структуры баротропной циркуляции вод в Тилигульском лимане, которая характеризует особенности интегрального по глубине водообмена между различными частями акватории. Из рис. 2а-4а видно, что на акватории лимана можно выделить четыре части, водообмен между которыми затруднен. Границы между частями проходят в районах Чиловой, Калиновской кос, коленноподобного изгиба лимана между Кордонской и Широкинской косами. Между этими границами формируются замкнутые циркуляционные структуры в соответствующих частях лимана.

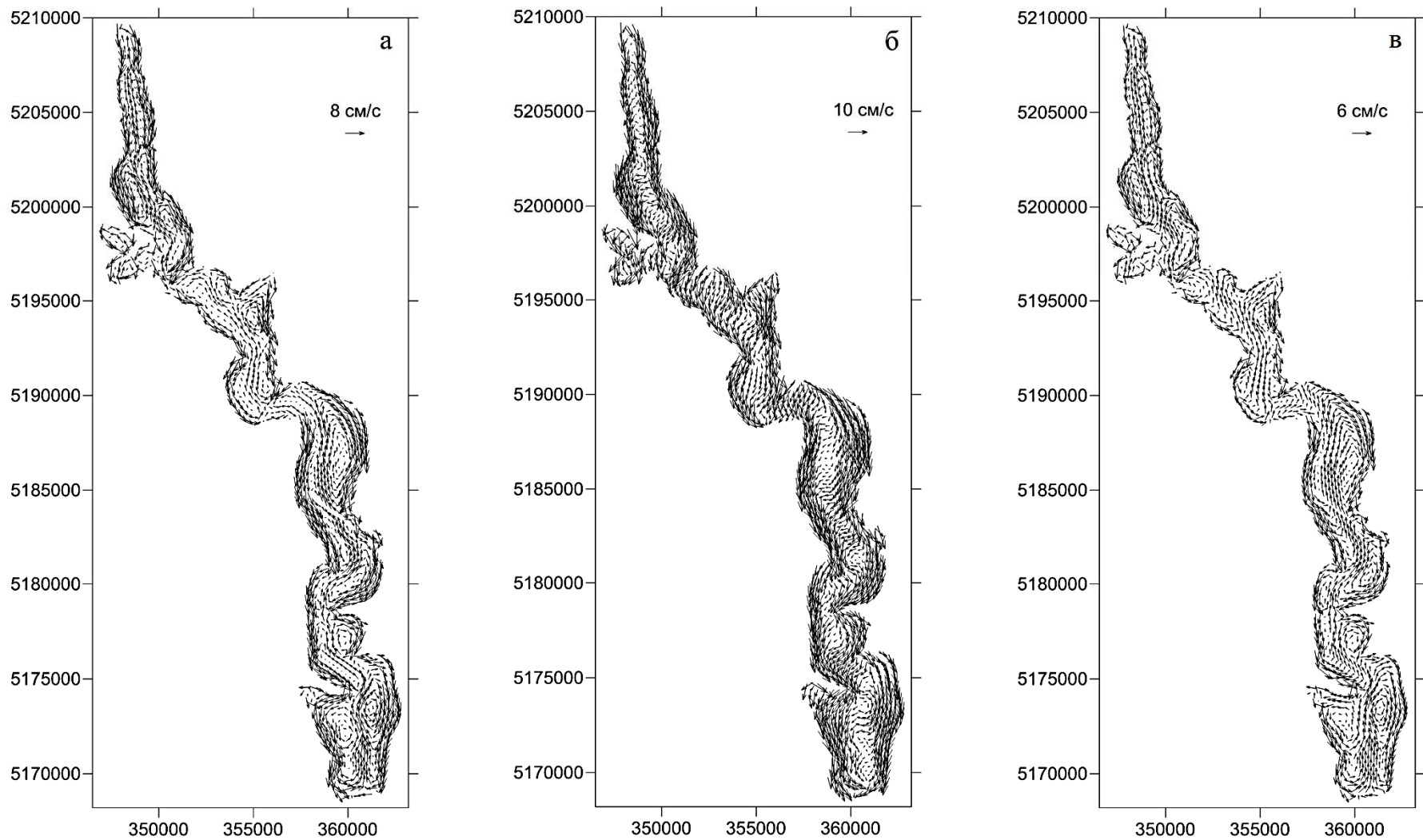


Рис. 2 – Поля векторов* средних по глубине (а), поверхностных (б) и придонных (в) течений в лимане при стационарном ветре северного направления скоростью 5 м/с.

* Для удобства чтения вектора прорежены с шагом 250 м.

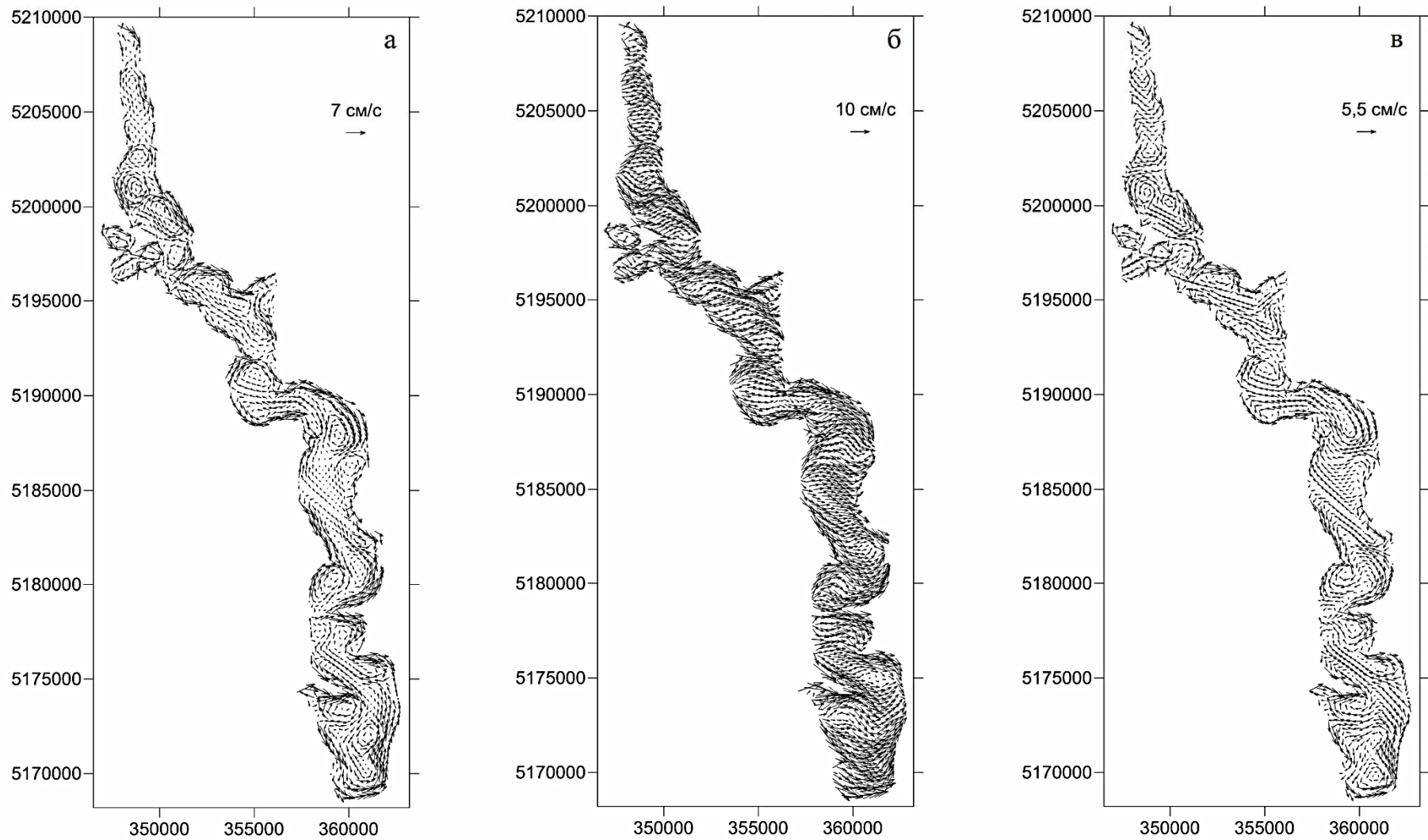


Рис. 3 – Поля векторов средних по глубине (а), поверхностных (б) и придонных (в) течений в лимане при стационарном ветре западного направления скоростью 5 м/с.

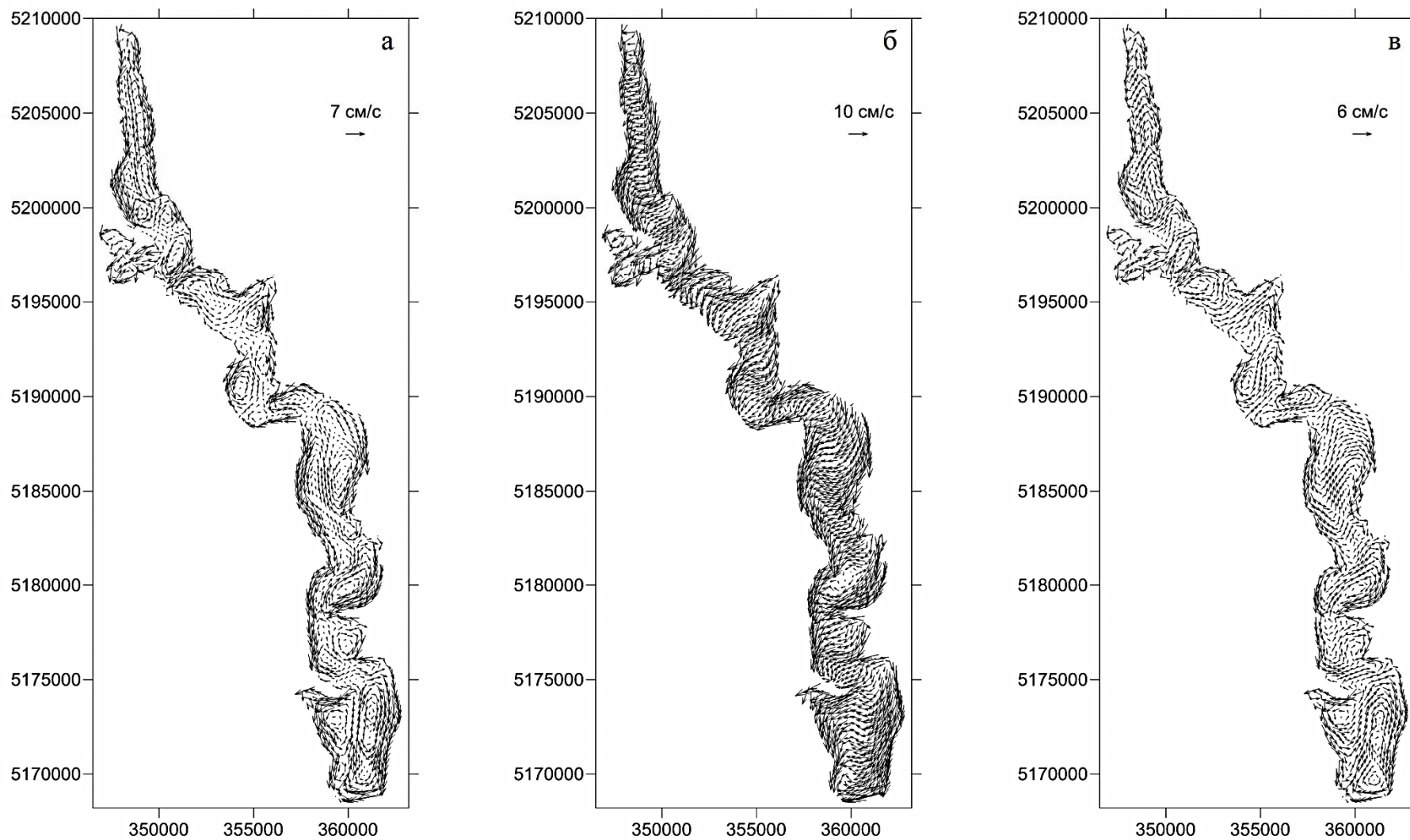


Рис. 4 – Поля векторов средних по глубине (а), поверхностных (б) и придонных (в) течений в лимане при стационарном ветре северо-восточного направления скоростью 5 м/с.

Как было сказано во введении, одной из главных гидроэкологических проблем Тилигульского лимана, являются периодически возникающие в летний период года массовые заморы гидробионтов на локальных участках прибрежной зоны лимана. Одной из причин развития заморов в прибрежной зоне лимана может быть подток на мелководье обедненных растворенным кислородом глубинных вод. Данные натурных наблюдений, выполненных летом 2010 г., свидетельствуют, что в глубокой центральной части лимана растворенный кислород может отсутствовать не только в придонном слое, а и на глубинах ниже границы верхнего квазиоднородного перемешанного ветром слоя (> 5 м). Подток в мелководную прибрежную зону глубинных вод с дефицитом кислорода будет происходить в зонах дивергенции дрейфовых течений у наветренных берегов. На рис. 5 приведены рассчитанные по модели поля вертикальной составляющей скорости ветровых течений для ветров западного и северо-восточного направлений. Видно, что ядра интенсивного подтока глубинных вод у наветренных участков берега имеют ярко выраженный очаговый характер. Именно на этих участках прибрежного мелководья следует ожидать развития заморов рыбы и других гидробионтов, при ветрах соответствующих направлений.

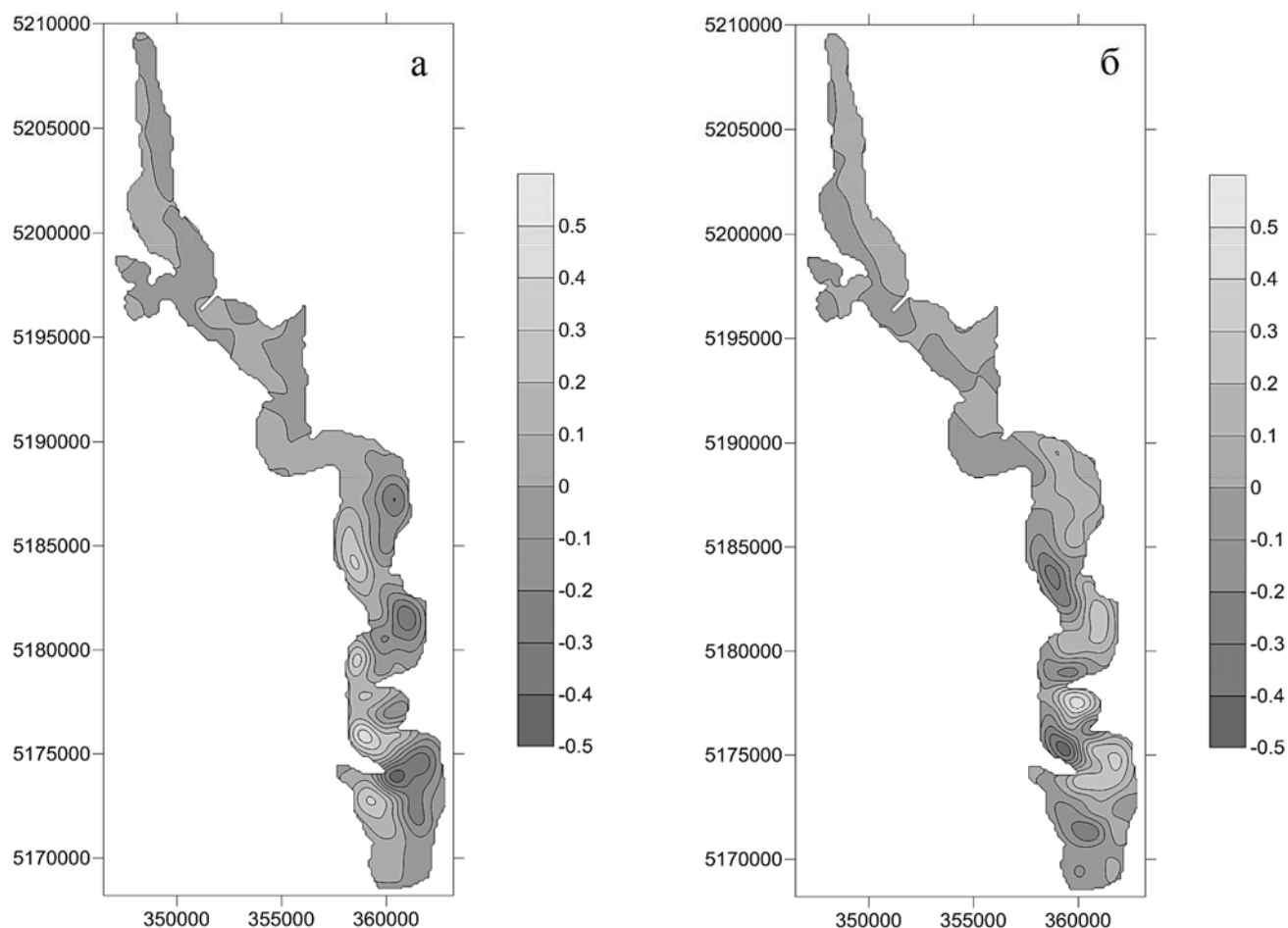


Рис. 5 – Поля вертикальной составляющей скорости ветровых течений в лимане ($\times 10^{-3}$ м/с) при стационарных ветрах западного (а) и северо-восточного (б) направлений.

Выводы. Использование имитационной гидродинамической модели Delft3D-FLOW для моделирования ветровой циркуляции вод Тилигульского лимана позволило выявить особенности пространственной структуры ветровых течений в различных частях его акватории. Установлено, что из-за вытянутости лимана в меридиональном направлении, значительной изрезанности береговой линии и изменчивости пространственной ориентации различных ее участков, пространственная структура течений определяется направлением ветра.

При продольных по отношению к меридиональной оси лимана ветрах, в прибрежных, относительно мелководных областях формируются интенсивные, протяженные, однонаправленные по глубине потоки. Вдоль продольной осевой линии лимана, формируются направленные противоположно ветру придонные градиентные противотечения, которые ослабляют дрейфовые течения в поверхностном слое.

При поперечных по отношению к оси лимана ветрах, протяженные интенсивные вдольбереговые потоки вод в центральной и южной частях лимана не образуются. Интенсификация прибрежных течений имеет локальный характер, обусловленный конфигурацией береговой черты. В открытой, глубокой части акватории лимана дрейфовые поверхностные течения более интенсивны, чем в случае продольных ветров, поскольку они в меньшей мере ослабляются придонными компенсационными течениями.

Установлено, что в случаях, когда вектор скорости ветра направлен по нормали к достаточно протяженному участку береговой линии лимана, которая является наветренной, то на этих участках в заливах (вогнутостях береговой линии в сторону противоположную ветру) образуются локальные зоны дивергенции поверхностных течений, которым соответствует подток в прибрежную мелководную зону глубинных вод, обедненных кислородом. Высказана гипотеза, что именно на этих участках прибрежного мелководья глубоких южной и центральной частей лимана могут возникать заморы рыбы и других гидробионтов, при ветрах соответствующих направлений.

На основе анализа пространственной структуры баротропной циркуляции вод выделены четыре части лимана, интегральный по глубине водообмен между которыми затруднен. Границы между частями проходят в районах Чиловой, Калиновской кос, коленноподобного изгиба лимана между Кордонской и Широкинской косами.

Список литературы

1. Тучковенко Ю.С. Главные гидроэкологические проблемы Тилигульского лимана / Ю.С. Тучковенко, О.А. Тучковенко // Матеріали всеукр. науково-практ. конф. «Лимани північно-західного Причорномор'я: актуальні гідроекологічні проблеми та шляхи їх вирішення».- Одеса: ОДЕКУ, 12-14 вересня 2012 р. – С. 63-66.
2. Тимченко В.М. Эколого-гидрологические исследования водоемов северо-западного Причерноморья: Монография / В.М. Тимченко.– Киев: Наукова думка. – 1990.– 238 с.
3. Лиманы Северного Причерноморья: Монография / В.С. Полищук и др.; под ред. О.Г. Миронова; Ин-т гидробиологии АН УССР. – Киев: Наукова думка, 1990. – 204 с.

4. Фельзенбаум А.И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений: Монография/ А.И. Фельзенбаум – М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 122 с.
5. Тучковенко Ю.С. Моделирование водообмена Тилигульского лимана с Черным морем / Ю.С. Тучковенко, В.А. Иванов, О.А. Тучковенко // Морской гидрофизический журнал. – Севастополь: Морск.гидрофиз.журнал. – 2012. – № 5. – С. 42- 58.
6. Актуальные проблемы лиманов северо-западного Причерноморья: Монография / Ю.С. Тучковенко, Е.Д. Гопченко и др.; Одесский госуд. экологич. ун-т. – Одесса: ТЕС, 2012. – 224 С.
7. Исследовательский институт Deltares. – Описание и коды моделей Delft3D. – Режим доступа: <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/>, свободный.- Язык англ.
8. Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual, version 3.15. – Deltares systems, Delft, the Netherlands, 2013. – 702 pp.
9. Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н. Режим ветра северо-западной части Черного моря и его климатические изменения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 2009.– Вып. 17.– С. 225 - 243.

Моделювання вітрової циркуляції вод у Тилигульському лимані.

Тучковенко Ю.С., Кушнір Д.В.

*Приведені результати розрахунків та аналізу трьохвимірної вітрової циркуляції вод на акваторії Тилигульського лиману при стаціонарних вітрах різних напрямлень. Розрахунки виконані з використанням гідродинамічної моделі Delft3D-FLOW на криволінійній розрахунковій сітці. **Ключові слова:** Північно-західне Причорномор'я, Тилигульський лиман, динаміка вод, моделювання.*

Modeling of wind-driven circulation of water in the Tiligul estuary.

Tuchkovenko Yu. S., Kushnir D.

*The results of the calculations and analysis of three-dimensional wind-driven circulation of water at the water area of the Tiligul estuary under stationary winds of different directions are given. The calculations are performed using a hydrodynamic model Delft3D-FLOW on a curvilinear computational grid. **Keywords:** North-Western Black Sea region, the Tiligul estuary, water dynamics, modeling.*