

УДК 551.468.4

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД
И ДЕНИВЕЛЯЦИЙ УРОВНЯ В КУЯЛЬНИЦКОМ ЛИМАНЕ****Ю. С. Тучковенко**, д-р геогр. наук**Д. В. Кушнир**, научн. сотр.**О. Н. Гриб**, канд. геогр. наук*Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, science@odeku.edu.ua*

Приведены результаты расчетов и анализа вызванных ветровым воздействием циркуляции вод и денивеляции уровня воды на акватории Куяльницкого лимана при стационарных ветрах скоростью 5 м/с различных направлений. Расчеты выполнены с использованием гидродинамической модели Delft3D-FLOW на криволинейной расчетной сетке. Верификация модели проведена на основе данных синхронных измерений изменчивости уровня воды, выполненных в 2016 г. в трех различных точках на акватории лимана. Установлено, что при продольных по отношению к меридиональной оси лимана ветрах, вдоль свала глубин в прибрежных областях формируются интенсивные, протяженные, однонаправленные по глубине потоки, направление которых соответствует меридиональной составляющей вектора скорости ветра. Вдоль продольной осевой линии лимана формируются направленные противоположно ветру придонные градиентные компенсационные противотечения. При поперечных по отношению к оси лимана ветрах, протяженные интенсивные вдольбереговые потоки вод в центральной и южной частях лимана не образуются; дрейфовые течения и интенсивность баротропной циркуляции вод на акватории лимана ослабевают; пространственная структура баротропной циркуляции вод характеризуется наличием множества мелкомасштабных циклонических и антициклонических вихрей. В южной и центральной частях лимана, между западным и восточным его берегами, в водной толще формируются циркуляционные ячейки в вертикальной плоскости. Показано, что даже относительно слабые ветра могут значительно изменять площадь водного зеркала лимана и таким образом влиять на объема испарения.

Ключевые слова: Северо-западное Причерноморье, Куяльницкий лиман, ветровые течения, водное зеркало, моделирование.

1. ВВЕДЕНИЕ

Куяльницкий лиман (46° 33,6' – 46° 48' с. ш., 30° 34,8' – 30° 46,2' в. д.) расположен в 2 км к юго-западу от побережья Одесского залива и является одним из древнейших закрытых лиманов Северо-Западного Причерноморья. Лиман вытянут субмеридионально и является продолжением долины реки Большой Куяльник. Согласно Постановлению Кабинета Министров Украины от 11 декабря 1996 г. №1499 Куяльницкий лиман включен в перечень водных объектов, относящихся к категории лечебных.

В результате влияния глобальных изменений климата, которые происходят с середины 80-х годов прошлого столетия, и хозяйственной деятельности человека на водосборе Куяльницкого лимана, в период 2003-2014 гг. произошло уменьшение его протяженности с 26 до 15,3 км; площади водного зеркала – с 52,0 до 26,7 км²; объема водной массы – с 68 до 11 млн. м³; руслового стока – с 15,6 до 1,5 млн. м³. Соленость рапы увеличилась со 108 до 300 ‰ [1]. Возникла

угроза полного исчезновения лимана и потери запасов уникальных лечебных грязей и рапы, а также своеобразной флоры и фауны водоема.

Для предотвращения угрозы полного высыхания лимана и потери его природных ресурсов, засоления почв прилегающих территорий, в декабре 2014 года была введена в эксплуатацию водопропускная система, через которую в течение последних лет Куяльницкий лиман пополняется морской водой из Одесского залива в зимне-весенний период года. Хотя пополнение лимана морской водой в современных условиях является необходимым и оправданным шагом для сохранения его природных ресурсов, но в долгосрочной перспективе это будет приводить к накоплению в лимане солей. Поэтому следующим шагом, предусмотренным «Региональной программой сохранения и восстановления водных ресурсов в бассейне Куяльницкого лимана на 2012-2018 гг.», предусмотрено восстановление природного притока пресных вод с водосборного бассейна лимана, прежде всего стока реки Большой Куяльник, путем регулирования

водохозяйственной деятельности на ее водосборе.

В связи с периодическим поступлением в лиман значительных объемов морских вод, возможным увеличением объемов стока реки Б. Куяльник, которые различаются между собой по гидроэкологическим показателям качества воды [2], поступлением со стоком других водотоков в лиман разного рода загрязняющих веществ [3], актуальной является задача определения особенностей системы течений, которые формируются на акватории лимана под действием ветра и определяют распространение в нем вод различного происхождения и качества.

Цель работы заключается в определении особенностей ветровой циркуляции вод в Куяльницком лимане на основании результатов численного математического моделирования.

В предыдущей работе [4] авторами статьи были описаны результаты математического моделирования пространственно-временной изменчивости гидрологических характеристик Куяльницкого лимана (уровня, солености, температуры воды), однако особенности циркуляции вод в нем не анализировались. Сведения о системе течений в Куяльницком лимане в научной литературе отсутствуют. В работе [5] приведено лишь описание генеральной схемы циркуляции вод в закрытых лиманах Северо-Западного Причерноморья. В отношении Куяльницкого лимана указывается, что по данным измерений, время стабилизации ветровых течений в нем составляет несколько часов, а диапазон изменчивости ветрового коэффициента, т.е. отношения скорости дрейфового течения в приповерхностном слое к скорости ветра, очень широк – от 0,005 до 0,040. Сделан вывод, что из-за сильной временной изменчивости ветровых условий и пространственно-временной изменчивости ветровых течений, на основе данных инструментальных измерений получить представление о режиме течений в закрытых лиманах Северо-Западного Причерноморья невозможно; для этого надо использовать методы математического моделирования.

Краткие сведения о сгонно-нагонных денивелициях уровня воды в Куяльницком лимане приведены в работе [6]. Отмечается, что по данным 25-летних наблюдений ветровая денивелиция уровня воды в лимане не превышала 0,1-0,15 м. При этом, сведения о том, в какой точке(-ах) акватории проводились наблюдения, отсутствуют. В то же время отмечается, что максимальный нагон в южной части лимана в 1940 г. составлял 0,35 м.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

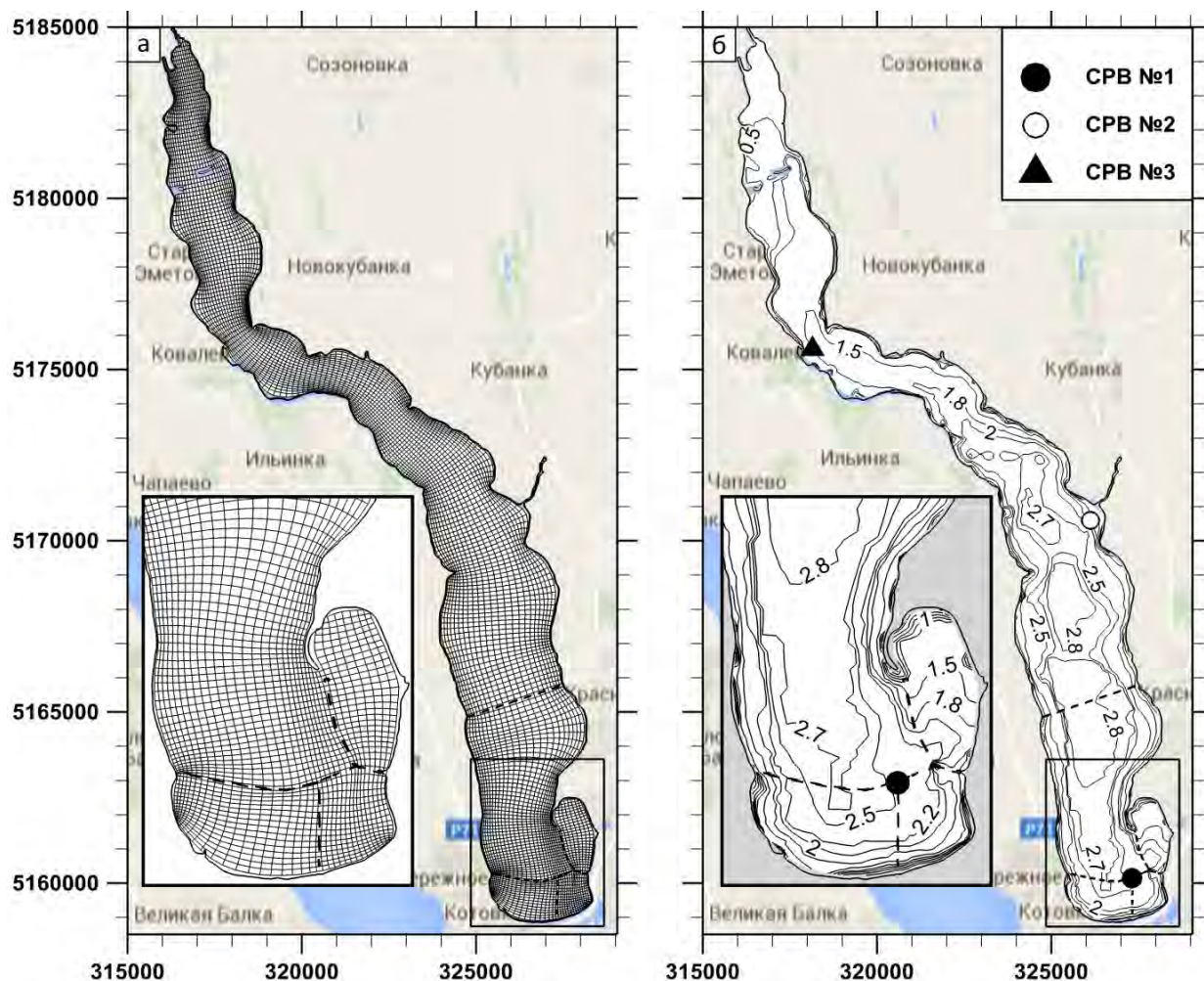
Для решения поставленной задачи использовалась нестационарная трехмерная численная гидродинамическая модель Delft3D-FLOW [7]. При моделировании использовалась криволинейная расчетная сетка, состоящая из 39×270 расчетных ячеек с переменными размерами: от 40 до 280 м (рис. 1а). Глубины в лимане задавались на основе батиметрических данных, снятых с оцифрованной топографической карты масштаба 1:25000, дополненных данными об отметках дна лимана, полученных в ходе батиметрических съемок в 2009 и 2016 гг. [1, 8]. По вертикали задавались 15 расчетных уровней переменной толщины, реализованные в σ -системе координат.

Поскольку динамика уровня воды в лимане определяется баротропными ветровыми течениями, то калибровка и верификация модели выполнялись на основе данных синхронных измерений изменчивости уровня воды в лимане, выполненных специалистами Одесского государственного экологического университета (ОГЭКУ) в 2016 г. [8] с использованием самописцев уровня, установленных в 3-х различных точках на акватории лимана (рис. 1б). Моделирование проводилось для временного периода 15:00 27.10.2016 г. – 00:00 31.10.2016 г. При расчетах на верхней границе модели задавалась временная изменчивость скорости и направления ветра (с 30-ти минутной дискретностью) на основании данных архива погоды в г. Одессе (рис. 2) [9]. Временной шаг решения уравнений модели принимался равным 30 с. Отметка уровня воды в лимане в начальный момент времени принималась равной -6,35 м БС, в соответствие с данными наблюдений.

Результаты верификации модели представлены на рис. 3. Заметим, что некоторое отклонение динамики расчетных значений уровня воды от наблюдаемых в лимане объясняется использованием данных об изменчивости скорости и направлении ветра, полученных на метеостанциях, расположенных на некотором удалении от лимана в пределах городской черты г. Одессы.

Значения основных коэффициентов уравнений модели, используемые при расчетах, приведены в табл. 1.

Расчеты типовой (установившейся) ветровой циркуляции вод проводились в течение 10 суток модельного времени при стационарных ветрах скоростью 5 м/с восьми основных румбов. Согласно данным многолетних метеорологических наблюдений, в районе г. Одессы преобладают ветра С, СЗ, З и Ю направлений [10-12].



* На осях указаны отметки сетки Универсальной поперечной проекции Меркатора (UTM) в метрах, зона 36N.
 ** Глубины в лимане приведены к отметке уровня -4,8 м БС.

Рис. 1 – Криволинейная расчетная сетка для акватории Куяльницкого лимана (а)*. Батиметрическая карта лимана и схема расположения самописцев уровня воды (СРВ №1-№3), установленных на акватории лимана в 2016 г. (б)**.

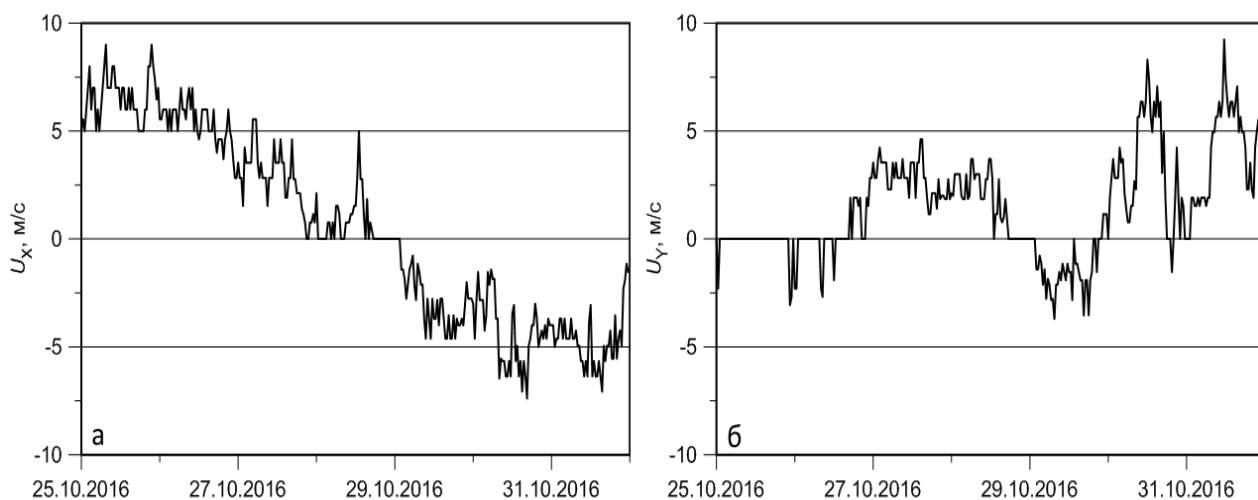


Рис. 2 – Временная изменчивость зональной (а) и меридиональной (б) компонент скорости ветра в 2016 г., м/с, по данным [9] для г. Одессы.

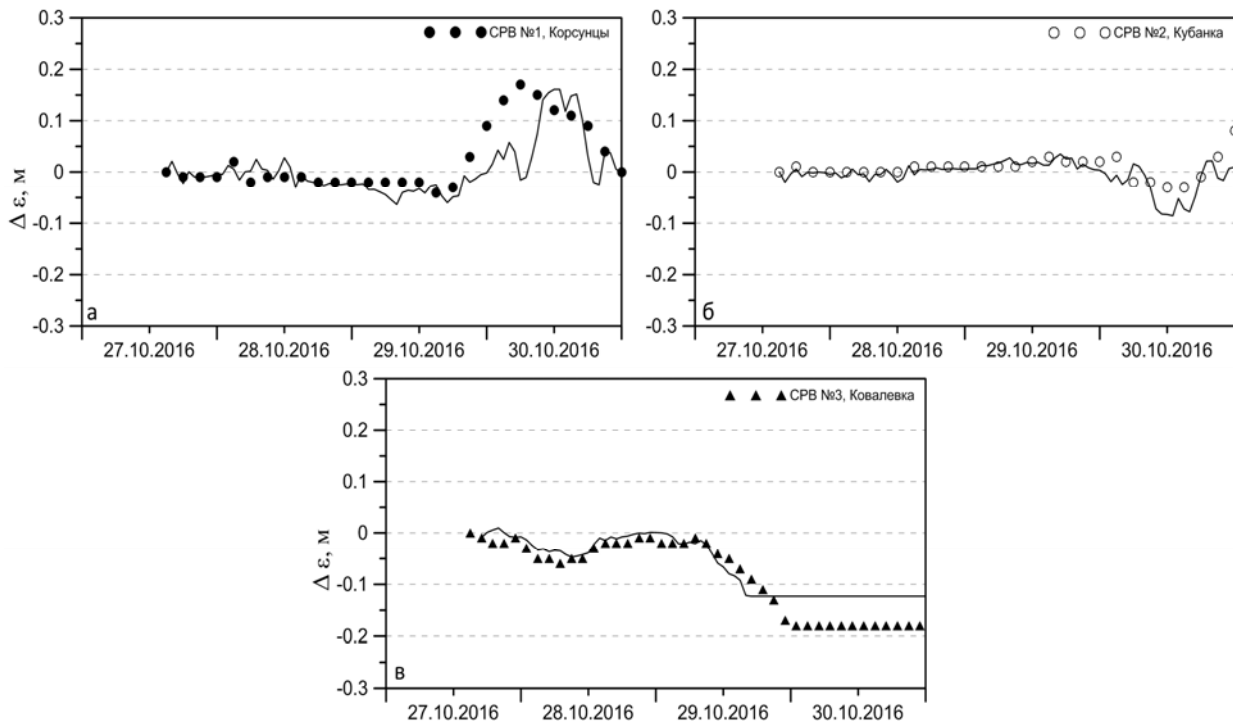


Рис. 3 – Изменчивость отклонений уровня воды в лимане от начальной отметки, м, по данным моделирования (кривые) и по данным полевых наблюдений ОГЭКУ (точки): а – CPB №1, Корсунцы; б – CPB №2, Кубанка; 3 – CPB №3, Ковалевка

Таблица 1 – Значения основных коэффициентов модели, используемые при расчетах

| № п/п | Название коэффициента | Используемое значение | Источ-ник |
|-------|--|---|-----------|
| 1. | Коэффициент поверхностного ветрового трения C_d | Получено кусочно-линейной интерполяцией вида $C_d = f(U)$, где $C_d = \begin{cases} 0,004, & U \leq 5 \text{ м/с,} \\ 0,00325, & 5 < U \leq 10 \text{ м/с,} \end{cases}$ U – скорость ветра, м/с. | [13] |
| 2. | Параметр Маннинга n для расчета коэффициента придонного трения C_{3D} | 0,018 | [14] |
| 3. | Пороговый коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости $\nu_H, \text{ м}^2/\text{с}$ | Переменное, в зависимости от размеров расчетной ячейки Δ , м: $\nu_H, D_H = \gamma \Delta^{4/3},$ где $\gamma = 0,03$ – безразмерный эмпирический коэффициент. | [15] |
| 4. | Пороговый коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии $D_H, \text{ м}^2/\text{с}$ | | |
| 5. | Пороговый коэффициент вертикальной турбулентной вязкости $\nu_V, \text{ м}^2/\text{с}$ | 1×10^{-6} | [7] |
| 6. | Пороговый коэффициент вертикальной турбулентной диффузии $D_V, \text{ м}^2/\text{с}$ | | |

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Моделирование ветровых течений в Куяльницком лимане показало (рис. 4-7), что, несмотря на мелководность, в нем присутствуют как дрейфовые, так и компенсационные градиентные ветровые течения. Дрейфовые течения, направление которых соответствует ветру либо отклоняется от него на угол до 45° , доминируют в приповерхностном слое акватории. При ветрах с

продольной северной или южной составляющей они отчетливо проявляются вне прибрежной зоны свала глубин, в пределах которой формируются прибрежные, однонаправленные по глубине вдольбереговые потоки (рис. 4-5). Направление этих потоков соответствует меридиональной составляющей скорости ветра. Наибольшую интенсивность вдольбереговые потоки, формирующиеся вдоль западного и восточного побережья лимана в относительно глубоких южной и

центральной его частях, имеют при ветрах С, СЗ, Ю и ЮВ направлений. Скорости течений в этих потоках (при ветре скоростью 5 м/с) превышают 0,1 м/с, достигая на отдельных участках значений 0,15-0,19 м/с. Минимальные скорости поверхностных течений при продольных ветрах соответствуют меридиональной осевой линии лимана, поскольку ослабляются компенсационным потоком в придонном слое, меридиональное направление которого противоположно направлению ветра.

При восточных и западных ветрах протяженные и интенсивные вдольбереговые течения в лимане не формируются (рис. 6). Они локально присутствуют лишь на некоторых участках побережья, ориентированных вдоль линии восток-запад. Вдоль лимана имеет место чередование зональных полос относительной интенсификации и ослабления дрейфовых течений. При этом зонально ориентированной полосе ослабления дрейфовых течений в поверхностном слое соответствует усиление струи компенсационного течения в придонном слое. В целом для акватории, при поперечных по отношению к осевой линии лимана ветрах, ветровые течения в приповерхностном слое более слабые, чем при ветрах с продольной составляющей. Вдоль подветренных берегов формируется зона апвеллинга, а наветренных – даунвеллинга, т.е. формируются вертикально ориентированные циркуляционные ячейки.

На рис. (4а-ба, 7) приведены поля векторов баротропной циркуляции вод (средних по глубине векторов течений), которая формируется в Куяльницком лимане при стационарных продолжительных ветрах скоростью 5 м/с. Видно, что при ветрах с южной и северной составляющими, в прибрежной зоне свала глубин вдоль восточной и западной границ лимана доминируют однонаправленные по глубине течения. Вдоль меридиональной осевой линии лимана доминирует компенсационный поток, направление которого противоположно ветру. Между основными струями вдольбереговых прибрежных течений и струей компенсационного потока формируются локальные баротропные вихревые структуры: справа от струи компенсационного течения – антициклонические, слева – циклонические.

При поперечных ветрах восточного и западного направлений интенсивность баротропной циркуляции вод в лимане в целом ослабевает. Пространственная структура баротропных течений формируется множеством мелкомасштабных циклонических и антициклонических вихрей, положение которых определяется в первую очередь пространственной конфигурацией берегов, а также распределением глубин. Пространственная изменчивость отметок уровня воды и водного зеркала лимана при стационарных продолжительных ветрах различных направлений скоростью 5 м/с показана на рис. 8.

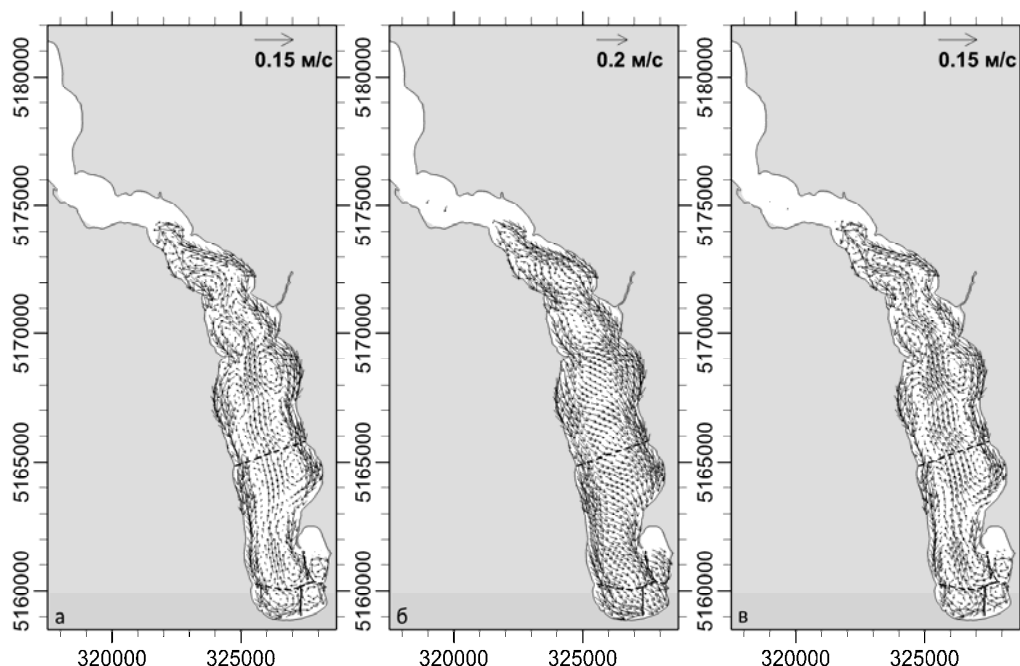


Рис. 4 – Поля векторов скорости осредненных по глубине (а), поверхностных (б) и придонных (в) течений, м/с, в Куяльницком лимане при стационарном ветре СЗ направления скоростью 5 м/с и начальной отметке уровня воды минус 6,35 м БС.

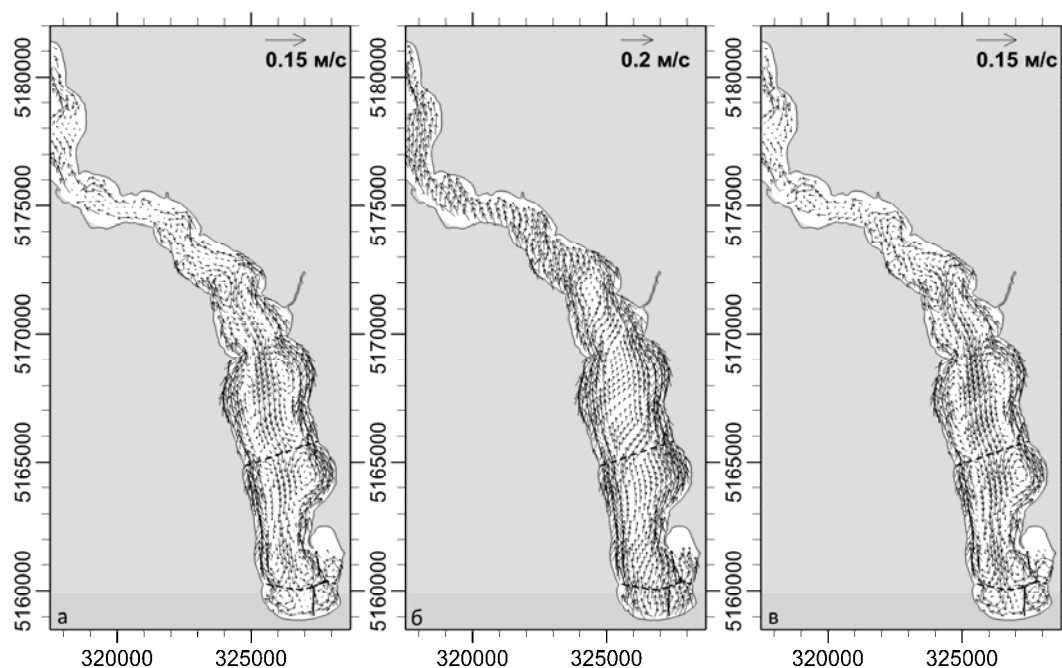


Рис. 5 – Поля векторов скорости осредненных по глубине (а), поверхностных (б) и придонных (в) течений, м/с, в Куяльницком лимане при стационарном ветре Ю направления скоростью 5 м/с и начальной отметке уровня воды минус 6,35 м БС.

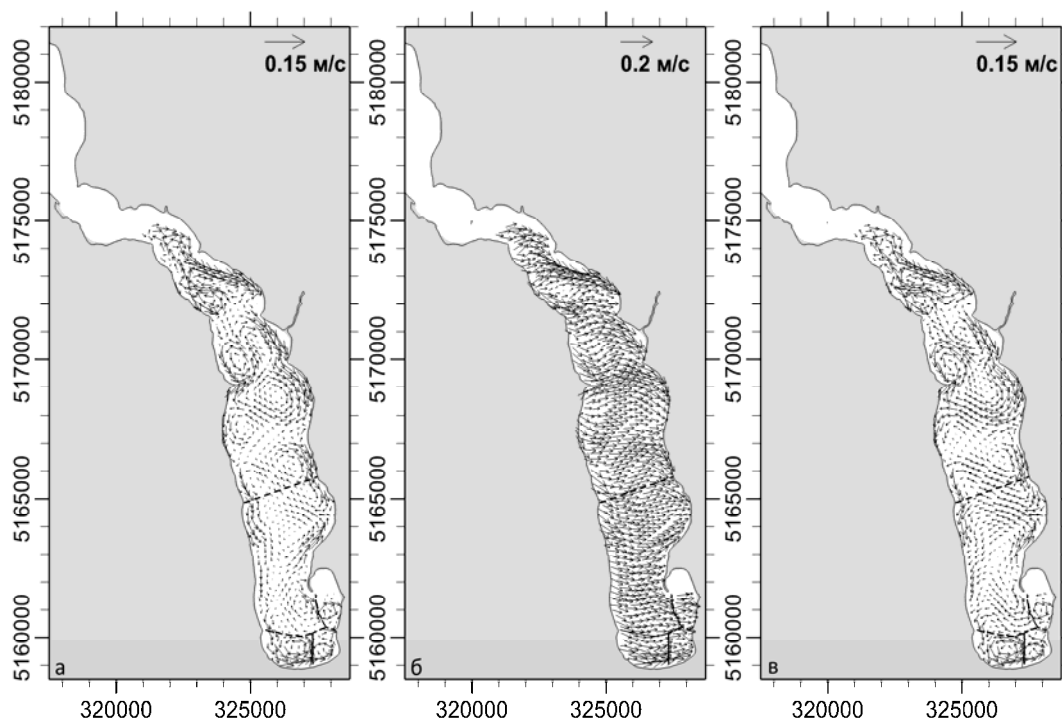


Рис. 6 – Поля векторов скорости осредненных по глубине (а), поверхностных (б) и придонных (в) течений, м/с, в Куяльницком лимане при стационарном ветре З направления скоростью 5 м/с и начальной отметке уровня воды минус 6,35 м БС.

Результаты моделирования свидетельствует, что даже при относительно слабых ветрах площадь водного зеркала лимана существенно изменяется. Так, при ветрах З, СЗ, С направлений, сгонных для северной части лимана, северная граница водной поверхности находится немного восточнее с. Ильинки. Перепад уровня между

северной и южной границами водной поверхности лимана составляет 0,25 м при С, СЗ ветрах и 0,15 м – при З ветре. Денивелиции уровня составляют 0,1-0,15 м и 0,05-0,1 м, соответственно.

При ветрах СВ, В, ЮЗ направлений северная граница водной поверхности лимана достигает с. Ковалевка. А при нагонных для северной час-

ти лимана Ю, ЮВ ветрах водная поверхность простирается выше с. Старая Эметовка. Перепад

уровня между северной и южной границами водной поверхности лимана при этом увеличивается до 0,67 м (денивелиции уровня: -0,07 м – в южной части и до +0,55 м – в северной части).

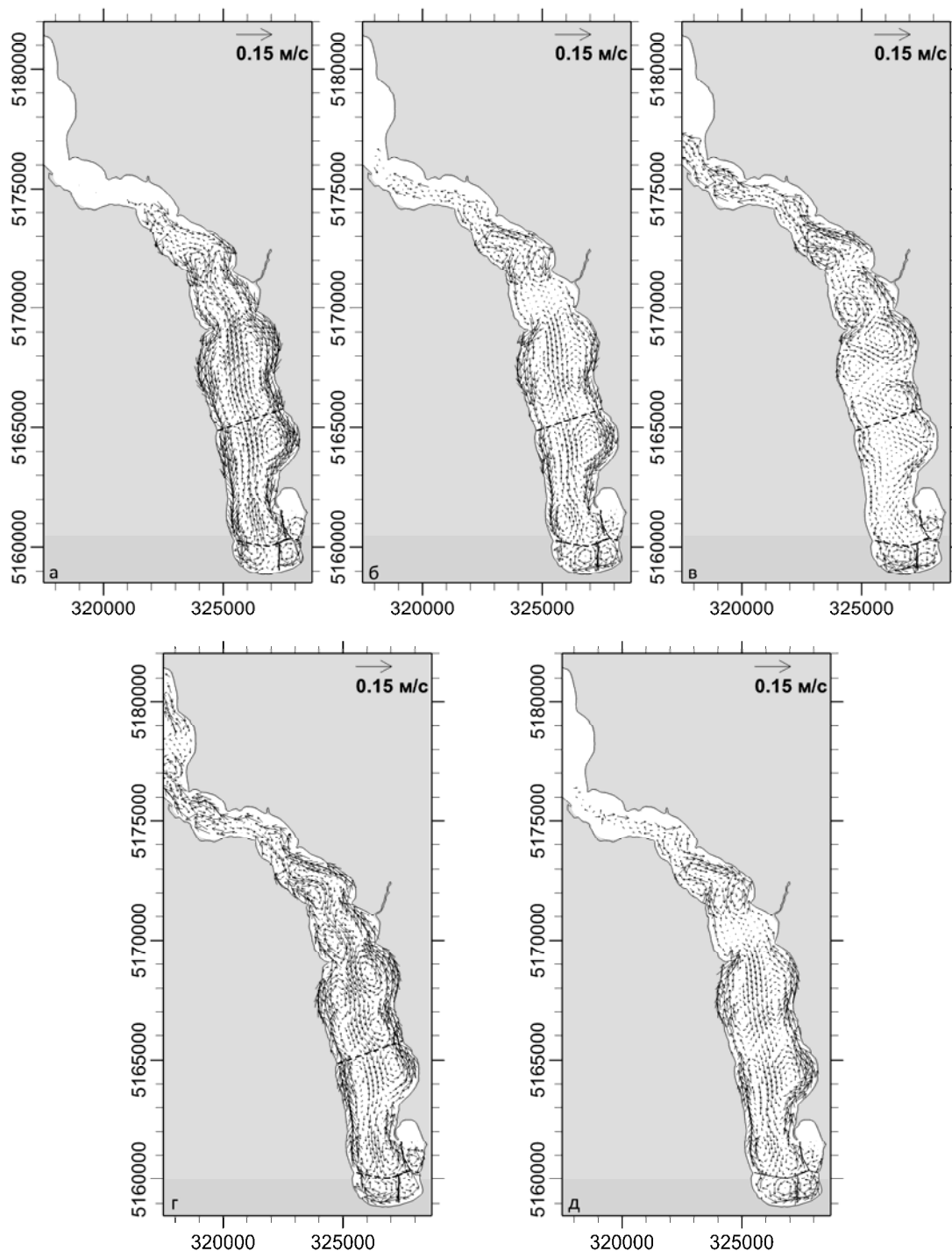


Рис. 7 – Пространственное распределение векторов скорости баротропных (средних по глубине) течений, м/с, в Куяльницком лимане при стационарных ветрах С (а), СВ (б), В (в), ЮВ (г), ЮЗ (д) направлений скоростью 5 м/с и начальной отметке уровня воды минус 6,35 м БС.

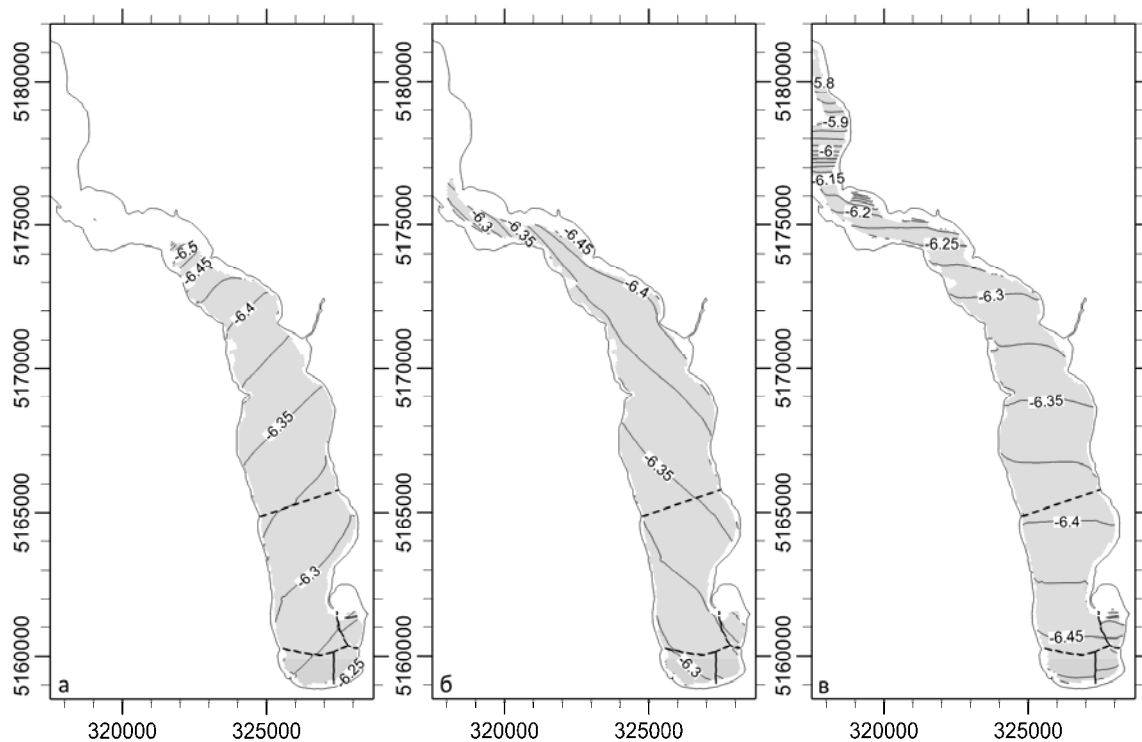


Рис. 8 – Пространственная изменчивость отметок уровня воды, м БС, в Куяльницком лимане при стационарных ветрах северного-западного (а), северо-восточного (б) и южного (в) направлений скоростью 5 м/с и начальной средней отметке уровня минус 6,35 м БС (изолинии уровня проведены через 0,025 м).

4. ВЫВОДЫ

Использование имитационной гидродинамической модели Delft3D-FLOW для моделирования ветровой циркуляции вод Куяльницкого лимана позволило выявить особенности пространственной структуры установившихся ветровых течений в различных частях акватории лимана и вызванных ними денивеляций водной поверхности.

Установлено, что при продольных по отношению к меридиональной оси лимана ветрах, в прибрежных относительно мелководных областях, вдоль свала глубин формируются интенсивные, протяженные, однонаправленные по глубине потоки, направление которых соответствует меридиональной составляющей вектора скорости ветра. Вдоль продольной осевой линии лимана формируются направленные противоположно ветру придонные градиентные компенсационные противотечения, которые ослабляют дрейфовые течения в поверхностном слое вне свала глубин.

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 в основном конфигурацией береговой черты. В целом для лимана, дрейфовые течения и интенсивность баротропной циркуля-

ции вод при восточных и западных ветрах слабее, чем при ветрах с продольной составляющей скорости. Пространственная структура баротропной циркуляции вод характеризуется наличием множества мелкомасштабных циклонических и антициклонических вихрей. Кроме того, в южной и центральной частях лимана, между западным и восточным его берегами, в водной толще формируются циркуляционные ячейки в вертикальной плоскости. При этом вдоль подветренных берегов формируется зона апвеллинга, а вдоль наветренных – даунвеллинга.

В результате моделирования также показано, что даже относительно слабые ветра могут значительно изменять площадь водного зеркала лимана и таким образом влиять на объемы испарения. Доминирование в летний период года ветров Ю и ЮВ направлений увеличивает потери объема воды лимана на испарение, а З, СЗ и С ветра, наоборот, их уменьшают.

Полученные результаты согласуются с данными наблюдений на водомерном посту «Одесса-Куяльник», расположенном в южной части лимана, и сведениями, приведенными в [5, 6]. В последующих исследованиях авторы намереваются определить вклад плотностных течений в формирование циркуляции вод в лимане при поступлении в него морских вод и/или увеличении стока р. Большой Куяльник.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Водний режим та гідроекологічні характеристики Куяльницького лиману: монографія / за ред. Н. С. Лободи, Є. Д. Гопченка; Од. держ. еколог. ун-т. Одеса: ТЕС, 2016. 332 с.
2. Богатова Ю. И. Гидрохимический режим Куяльницького лимана в современный период // Вісн. Одес. держ. екол. унів. 2016. №20. С. 61-68. <http://bulletin.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2016/08/6-BOGATOVA.pdf>.
3. Энан А. А., Шихалева Г. Н., Сизо А. В., Бабинец С. К. Оценка качества воды Куяльницького лимана по комплексу гидрохимических показателей с применением геоинформационных систем // Вісник ОНУ. 2010. Т. 15. Вип. 13. С. 61-71.
4. Тучковенко Ю. С., Кушнір Д. В. Результати чисельного моделювання внутрішньорічної мінливості характеристик гідрологічного режиму Куяльницького лиману // Укр. гідрометеорол. ж. 2016. № 17. С. 137-149. http://uhmj.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2016/07/15-Tuchkoven_Kushnir.pdf.
5. Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья: монографія / Ин-т гидробиологии АН УССР. Киев: Наукова думка, 1990. 240 с.
6. Розенгурт М. Ш. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов Одесских лиманов: монографія. Киев: Наукова думка, 1974. 224 с.
7. *Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, User Manual, Hydro-Morphodynamics, Version 3.15*. Delft, The Netherlands: Deltares systems, 2017. 702 p. http://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf. (accessed 23 May 2017).
8. Науково-дослідні роботи з гідрологічного, гідрохімічного, гідробіологічного та медико-біологічного обстеження стану Куяльницького лиману та морської води з Одеської затоки (гідрологічне обстеження) на 2016 рік. Звіт з НДР заключний (наук. кер. Н. С. Лобода). База даних УкрНТЕІ, бібл. Од. держ. еколог. ун-ту. ДР №0116U007903, 2016. 263 с.
9. Метеопост – Архив метеоданных в Одессе. <http://meteopost.com/weather/archive/> (дата обращения: 16.05.2017).
10. Метеопост – Климат Одессы (климатическая норма). <http://meteopost.com/weather/climate-normals/odessa/> (дата обращения: 16.05.2017).
11. Казаков А. Л. Об использовании различной информации по ветру в прикладных исследованиях // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. 2005. №49. С. 190-203.
12. Климатический кадастр Украины. Киев: Государственная гидрометеорологическая служба и др., 2006. <http://www.cgo.kiev.ua/index.php?dv=pos-klim-kadastr> (дата обращения: 18.07.2017 г.).
13. Kocyigit M. B., Falconer R. A. Modelling of wind-induced currents in water basins. *Water Management*, 2004, no. 157, pp. 197-210.
14. Chow Ven Te *Open channel hydraulics*. New-York: McGraw-Hill, 1959. 680 p.
15. Richardson L. F. Atmospheric diffusion shown on a distance-neighbor graph. *Proc. R. Soc.*, 1926, no. 110, ser. A, pp. 709-737.

REFERENCES

1. Loboda N. S., Gopchenko E. D. (Eds.) *Vodnyy rezhym ta hidroekologichni kharakterystyky Kuyal'nyts'koho lymanu* [Water conditions and hydroecological characteristics of the

- Kuialnytskyi Lyman Lagoon: Proceedings of Odessa State Environmental University]. Odessa: TES, 2016. 332 p.
2. Bogatova Yu. I. Hydrochemical conditions of the Kuialnytskyi Lyman Lagoon in the modern period. *Visn. Odes. derz. ekol. univ. – Bull. of OSENU*, 2016, no. 20, pp. 61-68. <http://bulletin.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2016/08/6-BOGATOVA.pdf>. (in Russian).
3. Enan A. A., Shikhaleeva G. N., Sizo A. V., Babinets S. K. Using GIS for water quality assessment of Kuyalnik Lyman, on the basis of hydro chemical parameters. *Odesa National University Herald. Chemistry*, 2010, vol. 15, no. 13, pp. 61-71. (in Russian).
4. Tuchkovenko Yu. S., Kushnir D. V. Results of numerical modelling of the annual variability of characteristics of hydrological conditions in the Kuialnytskyi Lyman Lagoon. *Ukr. gidrometeorol. zh. – Ukr. hydrometeor. J.*, 2016, no. 17, pp. 137-148. http://uhmj.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2016/07/15-Tuchkoven_Kushnir.pdf. (in Ukrainian).
5. Timchenko, V. M. *Ekologo-gidrologicheskie issledovaniya vodoemov Severo-Zapadnogo Prichernomor'ya* [Environmental and Hydrological Researches into the Water Bodies in the North-Western Black Sea Region: Proceedings of Institute of Hydrobiology of NASU]. Kyiv: Naukova Dumka, 1990. 240 p.
6. Rozengurt, M. Sh. *Gidrologiya i perspektivy rekonstruktsii prirodykh resursov Odesskikh limanov* [Hydrology and Prospects for Natural Resources Rearrangement in the Lagoons of the Odessa Region]. Kyiv: Naukova dumka, 1974. 224 pp.
7. *Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, User Manual, Hydro-Morphodynamics, Version 3.15*. Delft, The Netherlands: Deltares systems, 2017. 702 p. http://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf. (accessed 23 May 2017).
8. Loboda N. S. (scient. chief) *Scientific research work on hydrological, hydrochemical, hydrobiological and biomedical inspection of the conditions of the Kuialnytskyi Lyman Lagoon and seawater from the Odessa Bay (hydrological survey) for 2016. Final report*. UkrNTEI database, Library of Odessa State Environmental University, 2016, State Registration No. 0116U007903. 263 p. (in Ukrainian).
9. *Meteopost – Arkhiv meteorodannykh v Odesse* [Meteopost. Meteorological data repository in Odessa]. <http://meteopost.com/weather/archive/> (accessed 16 May 2017).
10. *Meteopost – Klimat Odessy (klimaticheskaya norma)* [Meteopost. Odessa climate (climatic standard)]. <http://meteopost.com/weather/climate-normals/odessa/> (accessed 16 May 2017).
11. Kazakov A. L. On the use of various information on the wind in applied research. *Meteorolohiya, klimatolohiya ta hidrololohiya – Meteorology, climatology and hydrology*, 2005, no. 49, pp. 190-203. (In Russian).
12. *Klimatychnyy kadastr Ukrayiny (standartni klimatychni normy za period 1961-1990)* [Climatic cadaster of Ukraine (climatic standard for the period 1961-2000)]. <http://www.cgo.kiev.ua/index.php?dv=pos-klim-kadastr> (accessed 18 July 2017).
13. Kocyigit M. B., Falconer R. A. Modelling of wind-induced currents in water basins. *Water Management*, 2004, no. 157, pp. 197-210.
14. Chow Ven Te *Open channel hydraulics*. New-York: McGraw-Hill, 1959. 680 p.
15. Richardson L. F. Atmospheric diffusion shown on a distance-neighbor graph. *Proc. R. Soc.*, 1926, no. 110, ser. A, pp. 709-737.

MODELLING OF WIND-INDUCED CIRCULATION OF WATER AND WATER LEVEL DENIVELLATION IN THE KUALNYTSKYI LYMAN LAGOON

Yu. S. Tuchkovenko, Dr. Sci. (Geography)
D. V. Kushnir, Researcher, **O. M. Hryb**, Cand. Sci. (Geography)

Odessa State Environmental University, 15, Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, science@odeku.edu.ua

Results of 3D hydrodynamic computations are presented to analyse the wind-induced circulation of water and the skewness in the heights of water level marks in the Kualnytskyi Lyman Lagoon under stationary winds with the speed of 5 m/s and various directions.

The computations were performed using a Delft3D-FLOW model on a curvilinear grid. The model was verified against the data obtained from synchronous measurements of the water level variability, which were conducted at three different points on the lagoon water surface in 2016.

It was found that under winds, which are longitudinal to the meridional lagoon axis, strong, extensive and unidirectional in depth currents are formed along the depth slope in the coastal regions. The direction of these extensive currents corresponds to the meridional component of the wind velocity vector. Gradient compensative bottom currents, directed inversely to the wind direction, are formed along the longitudinal axial line of the lagoon.

Under transversal to the meridional lagoon axis winds, strong, extensive alongshore currents in the central and southern parts of the lagoon are not formed; drift currents and intensity of barotropic circulation on the lagoon water surface weaken; spatial structure of the barotropic water circulation is characterized by the presence of a multitude of small-scale cyclonic and anticyclonic eddies. In the southern and central parts of the lagoon, between its western and eastern shores, circulating cells in the vertical plane are formed in the water column.

It is shown that even relatively weak winds can significantly change the water surface area of the lagoon and thus influence the evaporation volumes.

Keywords: North-Western Black Sea coast, the Kualnytskyi Lyman Lagoon, wind-induced currents, water table, modelling.

МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВОЇ ЦИРКУЛЯЦІЇ ВОД ТА ДЕНІВЕЛЯЦІЇ РІВНЯ У КУЯЛЬНИЦЬКОМУ ЛИМАНІ

Ю. С. Тучковенко, д-р геогр. наук, **Д. В. Кушнір**, наук. співр.,
О. М. Грїб, канд. геогр. наук

Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, science@odeku.edu.ua

Наведені результати розрахунків і аналізу викликаних вітровим впливом циркуляції вод та денівеляції рівня води на акваторії Куяльницького лиману при стаціонарних вітрах швидкістю 5 м/с різних напрямків. Розрахунки виконані з використанням гідродинамічної моделі Delft3D-FLOW на криволінійній розрахунковій сітці. Верифікація моделі проведена на підставі даних синхронних вимірювань мінливості рівня води, виконаних у 2016 р. в трьох різних точках на акваторії лиману. Встановлено, що при поздовжніх по відношенню до меридіональної осі лиману вітрах, уздовж звалу глибин в прибережних областях формуються інтенсивні, протяжні, односпрямовані по глибині потоки, напрямом яких відповідає меридіональної складової вектора швидкості вітру. Уздовж поздовжньої осьовій лінії лиману формуються спрямовані протилежно вітру придонні градієнтні компенсаційні протитечії. При поперечних по відношенню до осі лиману вітрах, протяжні інтенсивні уздовжберегові потоки вод в центральній та південній частинах лиману не утворюються; дрейфові течії та інтенсивність баротропної циркуляції вод на акваторії лиману слабшають; просторова структура баротропної циркуляції вод характеризується наявністю безлічі дрібномасштабних циклонічних та антициклонічних вихорів. У південній та центральній частинах лиману, між західним та східним його берегами, у водній товщі формуються циркуляційні осередки у вертикальній площині. Показано, що навіть відносно слабкі вітри можуть значно змінювати площу водного дзеркала лиману і таким чином впливати на обсяги випаровування.

Ключові слова: Північно-західне Причорномор'я, Куяльницький лиман, вітрові течії, водне дзеркало, моделювання.

*Дата першого подання: 28. 08. 2017
Дата надходження остаточної версії: 11. 09. 2017
Дата публікації статті: 30. 11. 2017*