

УДК 551.468.4

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ВОДООБМЕНА С МОРЕМ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ И СОЛЕННОСТИ ВОДЫ В ТИЛИГУЛЬСКОМ ЛИМАНЕ

Ю.С. Тучковенко, д.геогр.н.,

Д.В. Кушнир,

Н.С. Лобода, д.геогр.н.

*Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, science@odeku.edu.ua*

На основе результатов гидродинамического моделирования с использованием численной модели Delft3D-FLOW определены возможности предотвращения дальнейшего засоления Тилигульского лимана путем реконструкции соединительного канала «лиман-море» и изменения регламента его функционирования, а также путем увеличения речного стока в лиман, с учетом климатических условий в первой половине XXI ст. Приведены результаты верификации гидродинамической модели. Показано, что для стабилизации уровня воды и уменьшения темпов роста солености вод в лимане наиболее эффективным является вариант круглогодичного функционирования углубленного соединительного канала «лиман-море». Этому будет способствовать разнонаправленный водообмен через канал, обусловленный вызванными ветром колебаниями уровня воды в лимане и море. Однако, при сохранении современного уровня водохозяйственной деятельности на водосборном бассейне лимана тенденция многолетнего увеличения солености его вод все же сохранится. Лишь восстановление природных объемов речного стока в лиман способно свести тенденцию увеличения солености его вод к минимуму.

**Ключевые слова:** Тилигульский лиман, водообмен с морем, соленость вод, гидродинамическое моделирование.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, в результате климатических изменений и антропогенной деятельности на водосборном бассейне Тилигульского лимана, существенно уменьшился поверхностный приток пресных вод в лиман, следствием чего стало его осолонение и периодическое обмеление [1]. В 60-х годах прошлого столетия, когда объемы стока реки Тилигул составляли значительную часть водного баланса лимана, средние значения солености воды в северной части лимана составляли 8,7 ‰, в центральной – 11,4 ‰, а в южной – 13-15 ‰. В современных условиях соленость воды в южной и центральной частях лимана даже весной, когда существует приток вод от реки Тилигул и слабый водообмен с морем через канал, может достигать значений 24-25 ‰ (апрель-май 2015 г.). В конце сентября 2014 г. была зафиксирована соленость вод лимана 27-28 ‰.

Следствием многолетней тенденции увеличения солености вод в лимане является смена доминирования в видовом составе водной флоры и фауны пресноводно-солонатоводных и солонатоводных комплексов на морские и солонатоводно-морские. По сравнению с началом 80-х годов прошлого столетия количество морских видов фитопланктона увеличилось с 14 до 64 ‰, морского и солонатоводно-морского макрофитобентоса – с 40 до 83 ‰, морского зоопланктона – с 40 до 90 ‰ [2, 3]. Если в 60-80 гг. XX столетия в лимане встречались от 12 до 25 видов пресноводных рыб, то в 2013 г. их количество сократилось до 4 видов. Вследствие климатических изме-

нений существует реальная опасность превращения в XXI ст. лимана в гипергалинный водоем со значительно меньшим биоразнообразием водной флоры и фауны, чем в настоящее время [1].

Большинство специалистов гидрологов, гидроэкологов и пользователей природными ресурсами Тилигульского лимана считают, что стабилизировать гидроэкологический режим лимана можно путем регулирования двух управляющих системой факторов: (1) обеспечения стабильного водообмена лимана с морем через искусственный соединительный канал при условии научно обоснованного регламента его функционирования; (2) реализации комплекса природоохранных мероприятий для восстановления природного (естественного) стока р. Тилигул и других малых рек в водосборном бассейне лимана, в частности, путем расчистки их русел, ликвидации неиспользуемых прудов и ограничения численности используемых, разработки правил их эксплуатации. Поэтому актуальной является задача оценки эффективности вышеуказанных мероприятий для предотвращения дальнейшего засоления лимана, с учетом влияния климатических изменений, которые отмечаются с конца 80-х годов XX ст. [1, 4].

### 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛИМАНА

Тилигульский лиман расположен на украинском побережье северо-западной части Черного моря, в 40 км от г. Одессы на территории 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 реки Тилигул. Он вытянут субмеридионально с северо-северо-запада на юго-юго-восток. В настоящее время его длина составляет 52 км, ширина изменяется на отдельных участках от 0,2 до 5,4 км. При отметке уровня воды в лимане минус 0,4 м БС (метров в Балтийской системе высот и глубин) площадь зеркала его водной поверхности равна 129 млн. м<sup>2</sup>, объем вод – 693 млн. м<sup>3</sup>. Южная и центральная части лимана являются котловинами с преобладающими глубинами в диапазоне 10-16 м, разделенными мелководной перемычкой – подводным продолжением Чиловой косы (рис. 1а). Максимальная глубина в южной части лимана достигает 22,2 м. Северная часть лимана, в которую впадает р. Тилигул, мелководная, с глубинами менее 4 м. Средняя глубина лимана составляет 5,4 м [1].

Площадь водосборного бассейна Тилигульского лимана – 5420 км<sup>2</sup>. В лиман впадают реки: Тилигул (площадь водосбора 3550 км<sup>2</sup>, длина 173 км), Балайчук (площадь водосбора 586 км<sup>2</sup>, длина 52 км), Царега (площадь водосбора 657 км<sup>2</sup>, длина 46 км), Хуторская (площадь водосбора 108 км<sup>2</sup>, длина 19 км). Поверхностный боковой приток пресных вод по временным водотокам (балкам, оврагам), которые впадают в лиман, формируется на площади 349 км<sup>2</sup>. Основная часть поступления речных вод в Тилигульский лиман (более 85 %) обеспечивается р. Тилигул [1]. 79 % от объема годового стока реки Тилигул поступает в лиман в феврале-апреле.

Лиман отделен от моря естественной песчаной пересыпью, в которой в конце 50-х годов XX века в рыбохозяйственных целях был проложен искусственный канал, соединивший лиман с морем. В настоящее время канал функционирует 3-4 месяца в году: открывается в апреле-мае путем расчистки морской части канала и действует до конца июля-

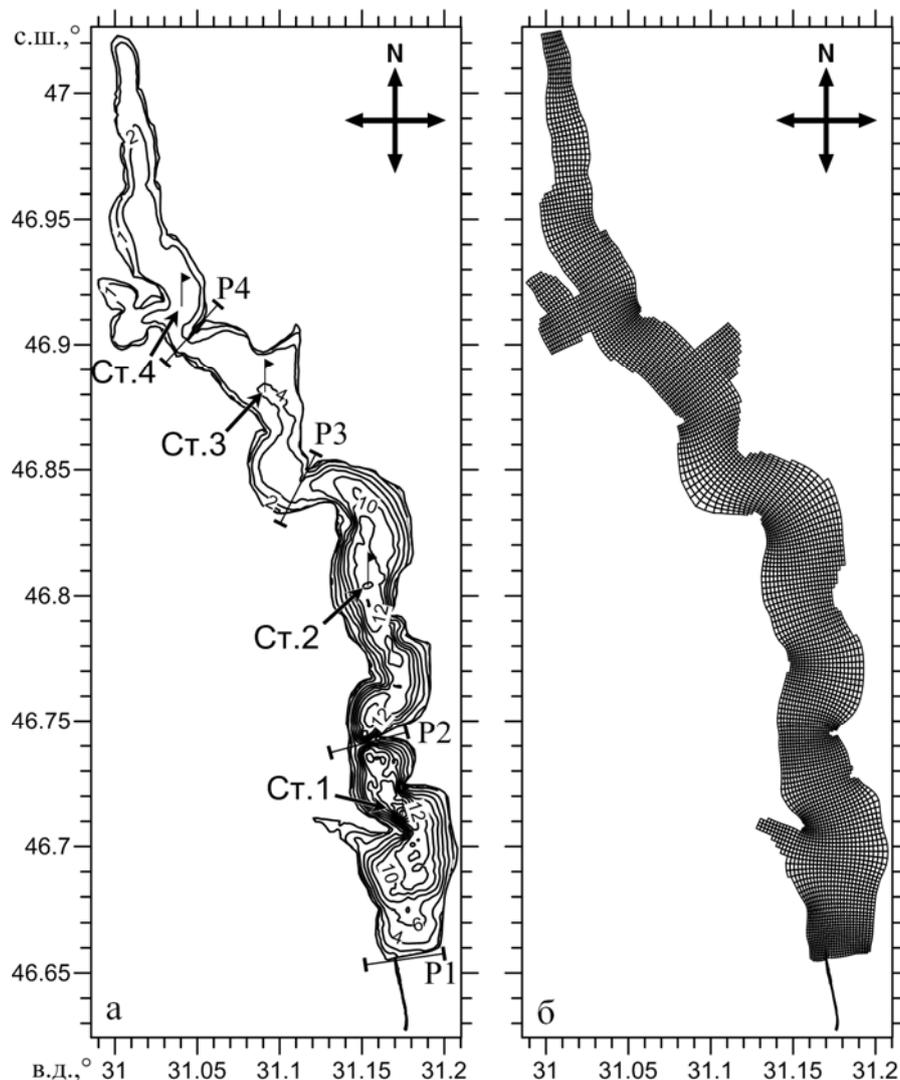


Рис. 1 – Батиметрическая карта акватории Тилигульского лимана, м БС; схема расположения реперных точек (обозначены Ст.1 - Ст.4) и поперечных разрезов для анализа результатов (обозначены P1-P4) (а). Криволинейная расчетная сетка (б).

начала августа, пока снова не замывается песком со стороны моря. Южная часть канала, примыкающая к морю, за прошедшие годы сильно обмелела. При отметке уровня моря минус 0,4 м БС глубины здесь составляют в среднем лишь несколько десятков сантиметров. Длина канала – 3,3 км.

Акватория северо-западной части Черного моря, примыкающая к Тилигульской пересыпи, находится под влиянием трансформированных речных вод Днепра и Южного Буга, поступающих из Днепровско-Бугского лимана. Это влияние максимально проявляется в период весеннего половодья в апреле-июне.

### 3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Водный режим Тилигульского лимана определяется объемами притока вод с его водосборного бассейна, соотношением количества атмосферных осадков, которые выпадают на водное зеркало лимана, и объемов испарения с него, наличием водообмена лимана с морем через искусственный соединительный канал.

В работе [1], с использованием стохастической модели «климат-сток», были получены диагностические и прогностические оценки природного и бытового (нарушенного водохозяйственной деятельностью) стока рек водосборного бассейна Тилигульского лимана, учитывающие изменения климатических факторов. Для наиболее вероятного регионального сценария изменений климата (полученного по модели РЕМО Института метеорологии им. Макса Планка, г. Гамбург) установлено, что годовой объем природного стока рек, питающих Тилигульский лиман, в период 2001-2040 гг. уменьшится по сравнению с периодом до начала глобального потепления (1953-1988 гг.) с 56,1 до 29,0 млн.м<sup>3</sup>, т.е. на 48,2 %. При сохранении современного уровня водохозяйственной деятельности в 2001-2040 гг. поступление пресных вод от водотоков в лиман (бытовой сток) уменьшится (за счет влияния многочисленных искусственных водоемов) с 29,0 до 13,6 млн.м<sup>3</sup>, то есть на 53 %. Суммарное уменьшение водных ресурсов рек водосбора лимана в 2001-2040 гг., по сравнению с периодом до 1989 г., за счет глобального потепления и водохозяйственной деятельности составит 75 %. Т.е., согласно классификации ООН, только за счет изменений климата к середине XXI в. произойдет разрушение водных ресурсов рек, питающих Тилигульский лиман, а при сохранении современного уровня водохозяйственной деятельности – безвозвратное разрушение.

Приведенные выше оценки оценки природного и бытового стока рек в первой половине XXI ст. свидетельствуют, что их роль в формировании водно-солевого баланса Тилигульского лимана будет уменьшаться. Этот вывод подтверждается данными наблюдений за стоком р. Тилигул в створе пгт. Березовка, который в период 1991-2010 гг. в среднем уменьшился на 43 % по сравнению с 1960-1989 гг., а также оценками годового пресного баланса лимана, который ранее был

положительным, но в современный период его дефицит составляет 24-34 млн.м<sup>3</sup>/год – в зависимости от уровня воды в лимане [5]. Поэтому пополнение лимана морской водой через искусственный соединительный канал «лиман-море» является необходимым условием стабилизации его водного и гидроэкологического режимов.

Цель работы заключается в оценке возможности предотвращения дальнейшего засоления Тилигульского лимана путем реконструкции соединительного канала «лиман-море» и изменения регламента его функционирования, а также путем увеличения речного стока в лиман, с учетом климатических условий в первой половине XXI ст.

Заметим, что расчеты изменчивости солености воды в лимане в XXI ст., выполненные с использованием модели водно-солевого баланса в [1], не учитывают влияние на водообмен лимана с морем короткопериодных (в течение нескольких суток) стоннонагонных колебаний уровня воды в лимане и море, а также гидродинамические процессы в лимане. Корректно учесть их влияние возможно лишь при решении задачи численного математического моделирования гидродинамических процессов. Однако, из-за вычислительных трудностей, использовать гидродинамические модели на временных масштабах больше годового цикла проблематично.

### 4. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Для решения поставленной задачи использовалась трехмерная гидротермодинамическая модель Delft3D-FLOW [6, 7]. Модель базируется на численном решении уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости на мелкой воде в приближении Буссинеска. Система дифференциальных прогностических уравнений модели состоит из уравнений движения в горизонтали, уравнения неразрывности, уравнений переноса тепла и солей с замыкающей двухпараметрической *k-ε*-моделью турбулентности. Для уравнения скорости вертикального движения принимается гидростатическое приближение. Уравнение состояния морской воды определяется формулой ЮНЕСКО [7]. Испарение с водной поверхности и теплообмен с атмосферой рассчитываются в модели с использованием полуэмпирических формул [8].

При проведении модельных расчетов акватория лимана покрывалась криволинейной ортогональной расчетной сеткой, состоящей из 53×316 ячеек в горизонтальной плоскости (рис. 16). Размеры ячеек сетки плавно изменяются в пределах 150-450 м вдоль продольной оси лимана и 120-300 м – в поперечном направлении. Однако, в области соединительного канала, где требуется большая детализация, задавались расчетные ячейки со средними размерами 23×45 м. В вертикальной плоскости использовались 43 расчетных уровня переменной толщины (от 0,2 до 1,0 м), реализованные в прямолинейной Z-системе координат. Глубины в лимане, приведенные к отмет-

ке уровня воды минус 0,4 м БС, задавались на основе обобщенных данных промерных работ, выполненных осенью 2010 и 2012 гг. (рис. 1а).

Калибровка модели проводилась по данным 2010 г., а валидация – для условий 2012 г. [5, 9]. Результаты верификации модели по данным эпизодических наблюдений за уровнем и солёностью воды в лимане, расходами воды в соединительном канале «лиман-море» приведены на рис. 2-4.

Расчеты проводились для метеорологических условий типового года климатического периода 2011-2041 гг. [10, 11], определенного по наиболее вероятному для региона климатическому сценарию из базы данных ENSEMBLES (модель REMO Института метеорологии им. Макса Планка, г. Гамбург).

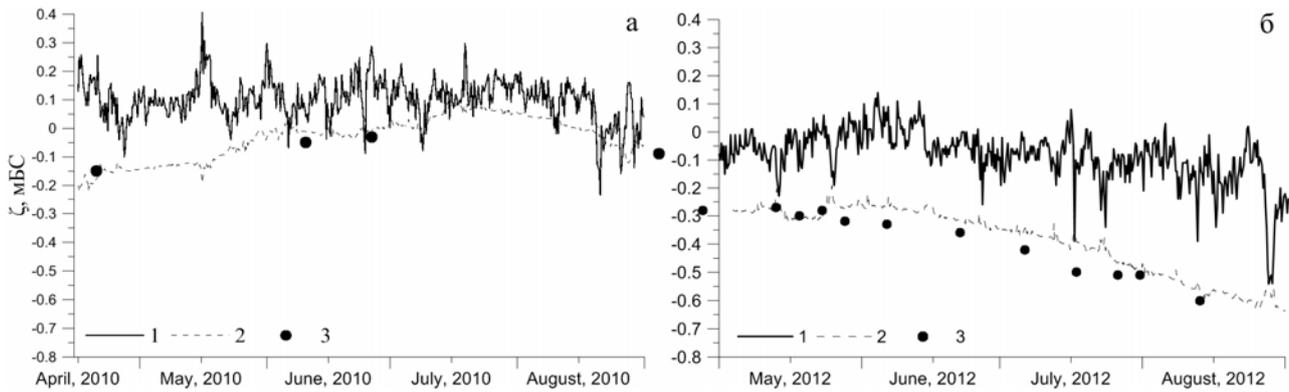


Рис. 2 – Временная изменчивость отметок уровня воды, м БС, в 2010 (а) и 2012 (б) годах на открытой морской границе соединительного канала (граничное условие) (1); полученная при моделировании в южной части лимана (2) и по данным эпизодических наблюдений (3).

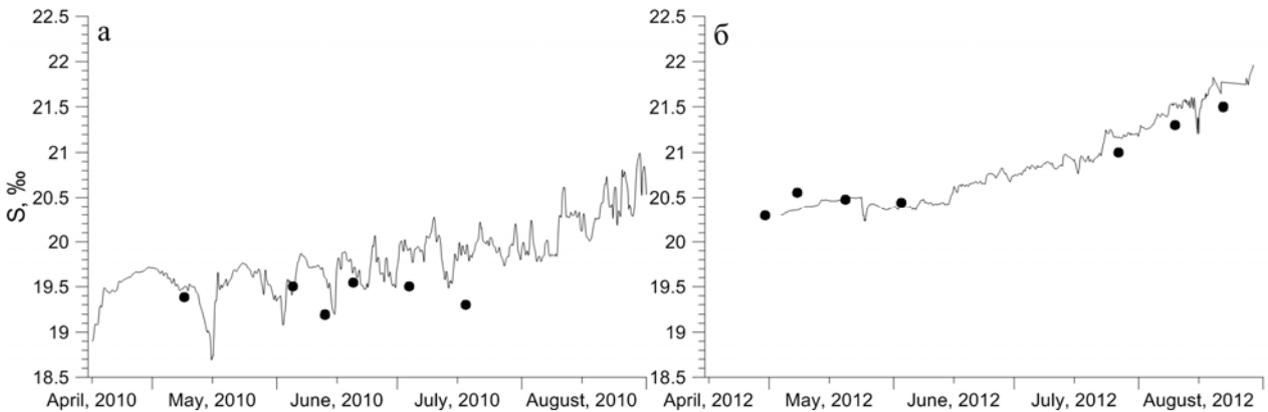


Рис. 3 – Временная изменчивость солёности, ‰, вод поверхностного слоя, полученная при моделировании (кривые) и по данным эпизодических наблюдений (точки) в 2010 (а) и 2012 (б) годах на прибрежном участке акватории между Чиловой и Ранжевой косами.

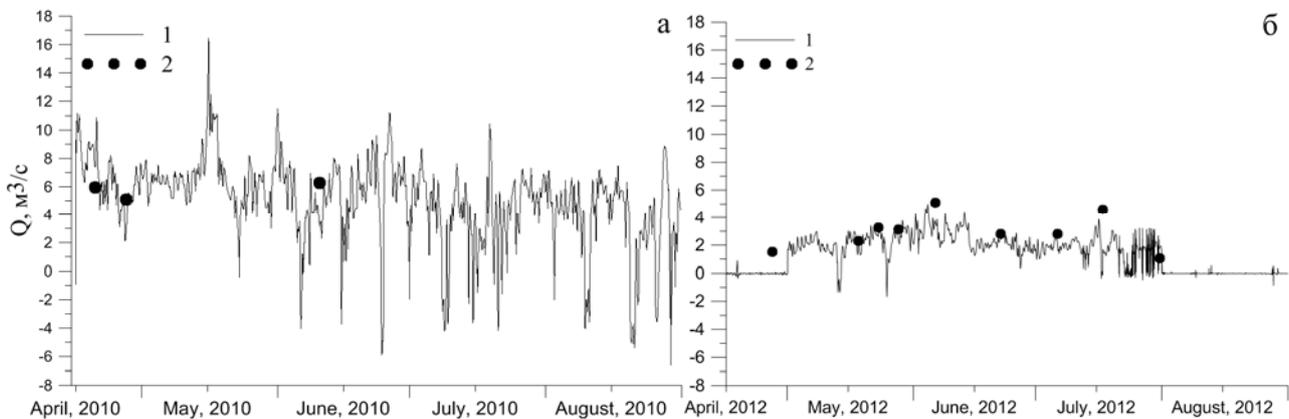


Рис. 4 – Временная изменчивость расходов воды, м<sup>3</sup>/с, в соединительном канале (у выхода в лиман) в 2010 (а) и 2012 (б) годах, полученная при моделировании (1) и по данным эпизодических наблюдений в лимане (2).

**Таблица 1** – Среднемесячные расходы (м<sup>3</sup>/с) природного и бытового стока рек бассейна Тилигульского лимана для среднего по водности года периода 2001-2040 гг.

№ п/п	Период	Сток реки							
		Тилигул		Царега		Балайчук		Хуторская	
		Природный	Бытовой	Природный	Бытовой	Природный	Бытовой	Природный	Бытовой
1.	январь	0,0179	0,0089	0,0014	0,0004	0,0014	0,0005	0,00016	0
2.	февраль	0,0434	0,0216	0,0034	0,00103	0,0035	0,0012	0,0004	0
3.	март	1,4637	0,7288	0,116	0,0348	0,1172	0,0389	0,01336	0
4.	апрель	3,7133	1,849	0,2943	0,0883	0,2974	0,0986	0,0339	0
5.	май	0,4903	0,2441	0,0389	0,0118	0,0393	0,013	0,00448	0
6.	июнь	2,1714	1,0812	0,1721	0,0516	0,1739	0,0577	0,01982	0
7.	июль	1,0199	0,5078	0,0808	0,0243	0,0817	0,0271	0,00931	0
8.	август	0	0	0	0	0	0	0	0
9.	сентябрь	0	0	0	0	0	0	0	0
10.	октябрь	0,1192	0,0594	0,0094	0,0029	0,0095	0,0032	0,00109	0
11.	ноябрь	0,1192	0,0594	0,0094	0,0028	0,0095	0,0032	0,00109	0
12.	декабрь	0,0121	0,006	0,001	0,0003	0,001	0,0003	0,00011	0
Средние за год:		0.0501	0.02496	0.00396	0.0012	0.004	0.00134	0.000458	0

В качестве входных данных для моделирования использовались среднесуточные значения температуры, относительной влажности воздуха, скорости и направления ветра, балла общей облачности, атмосферных осадков. Среднемесячные расходы природного (не нарушенного водохозяйственной деятельностью) и бытового стока рек Тилигул, Царега, Балайчук, Хуторская, которые питают лиман, задавались на основе результатов расчетов, полученных с использованием модели «климат-сток», для среднего по водности года климатического периода 2001-2040 гг. [1], согласно выбранному климатическому сценарию (табл. 1).

Для задания колебаний уровня моря на открытой морской границе канала использовались осредненные за период 2001-2012 гг. среднемесячные значения отметок уровня моря по данным наблюдений на ГМС «порт Южный». Ежедневные значения отметок уровня определялись интерполяцией среднемесячных значений, к которым добавлялись отклонения уровня, вызванные ветровым воздействием, рассчитанные с использованием методики, описанной в [1, 12]. Испарение с водной поверхности рассчитывалось в самой модели с учетом влияния ветра.

Значения температуры и солености воды лимана в начальный момент времени считались однородными в горизонтальной и вертикальной плоскостях и составляли +4 °С и 19 ‰ соответственно. Начальная отметка уровня воды в лимане принималась равной минус 0,4 м БС. Временной шаг решения уравнений модели с учетом условия Куранта-Фридрихса-Леви составлял 30 с.

Моделирование выполнялось для следующих вариантов водообмена с морем через соединительный канал «лиман-море»:

- вариант ВБ-1 (современный): бытовой речной сток; соединительный канал открыт в апреле-июле; глубина канала 0,25-1,3 м (при отметке уровня воды минус 0,4 м БС);

- вариант ВБ-2 (углубленный канал): бытовой речной сток; соединительный канал открыт в апреле-

июле; отметка дна канала минус 2,0 м БС;

- вариант ВБ-3 (углубленный канал): бытовой речной сток; соединительный канал открыт в течение всего года; отметка дна канала минус 2,0 м БС;

- вариант ВП-1: природный речной сток; соединительный канал открыт в апреле-июле; глубина канала 0,25-1,3 м (при отметке уровня воды минус 0,4 м БС);

- вариант ВП-2: природный речной сток; соединительный канал открыт в апреле-июле; отметка дна канала минус 2,0 м БС;

- вариант ВП-3: природный речной сток; соединительный канал открыт в течение всего года; отметка дна канала минус 2,0 м БС.

Рассматривался канал прямоугольного сечения шириной  $\approx 30$  м, т.е., при средней многолетней отметке уровня моря минус 0,11 м БС и отметке дна канала минус 2,0 м БС, площадь водного сечения канала составляла 56,7 м<sup>2</sup>.

Выбор отметки дна канала минус 2,0 м БС обусловлен тем, что, как свидетельствуют предварительные расчеты, выполненные при разной глубине канала, при такой отметке дна обеспечивается наполнение лимана до уровня моря в течение оптимального для безопасности природопользования времени.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Результаты расчетов изменчивости уровня воды в лимане, интенсивности водообмена с морем через соединительный канал, а также характеристик пространственно-временной изменчивости солености воды в различных (реперных) точках Тилигульского лимана (рис. 1а), полученные при моделировании вышеуказанных вариантов, приведены на рис. 5-10.

Анализ результатов расчетов позволяет сделать вывод, что при современной глубине и режиме функционирования соединительного канала (варианты ВБ-1 и ВП-1) объемы поступления морских вод через канал «лиман-море» недостаточны для компенсации дефицита пресного баланса лимана, который формируется в результате интенсивного испарения летом.

Отметка уровня воды в лимане, которая формируется в конце года, ниже, чем начальная, как при бытовом, так и при природном стоке с водосборного бассейна лимана. Из-за низкой пропускной способности соединительного канала уровень воды в лимане не достигает отметки уровня моря в период функционирования канала (рис. 5а), а водообмен с морем имеет однонаправленный (из моря в лиман) характер (рис. 6а), поскольку уровень моря всегда превышает уровень воды в лимане. При таком характере водообмена с морем лиман фактически является непроточным водоемом, что приводит к накоплению в нем

на протяжении многих лет солей, биогенных, загрязняющих веществ, поступающих в него с морскими водами и стоком с водосборного бассейна.

При углублении соединительного канала до отметки дна минус 2,0 м БС наполнение лимана до уровня моря после открытия канала будет происходить в течение двух декад, после чего водообмен лимана с морем становится разнонаправленным под воздействием инициированных ветром сгонно-нагонных колебаний уровня воды в лимане и море (рис 6б, в). Это будет способствовать частичному выведению из лимана накопленных запасов солей.

Обеспечение непрерывной в течение года работы канала позволит уменьшить годовую амплитуду колебаний уровня воды в лимане, при более высокой среднегодовой отметке уровня воды, соответствующей уровню моря (рис. 5в),

а также будет способствовать уменьшению солёности воды на всей акватории лимана (рис. 7) в результате интенсивного разнонаправленного водообмена через соединительный канал в течение всего года (рис 6в).

Максимальные колебания значений солёности воды будут свойственны северной части лимана (Ст. 4 на рис. 1), где в апреле-мае будут наблюдаться минимальные на акватории лимана значения, а в сентябре-октябре – максимальные (рис. 8, 9).

Во втором полугодии, при бытовом стоке р. Тилигул, северная часть лимана является источником засоления всей его акватории в результате интенсивного испарения (рис. 8б, в). Однако, при круглогодичном функционировании канала, южная часть лимана, солёность вод которой будет стабильно низкой вследствие интенсивного разнонаправленного водообмена с морем через соединительный канал, является источником вод с пониженной для акватории лимана солёностью. Распространение этих вод в центральную часть лимана в результате гидродинамических процессов (адвекции течениями и турбулентной диффузии) будет приводить к частичной компенсации эффекта повышения солёности вследствие выноса более солёных вод из северной части лимана (Ст. 1,2 на рис. 8в, 9в).

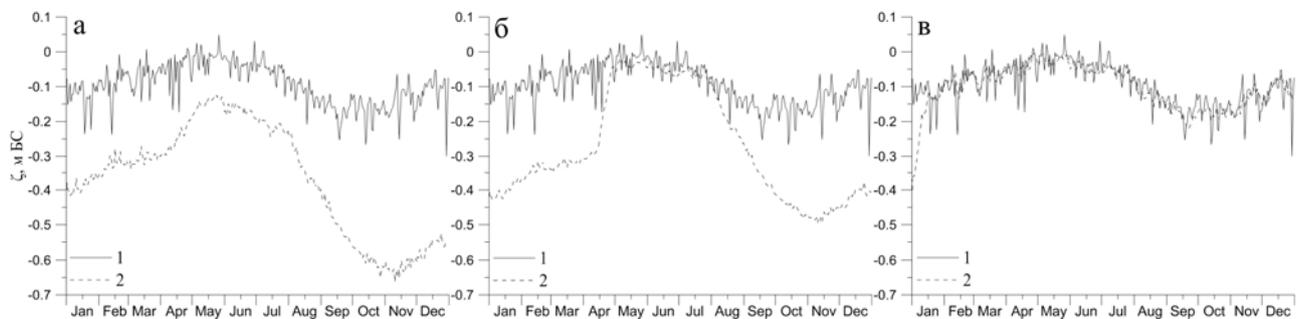


Рис. 5 – Временная изменчивость отметки уровня воды, м БС, на границе соединительного канала со стороны моря (граничное условие) (1) и лимана (2) при различных сценариях водообмена: а – ВБ-1; б – ВБ-2; в – ВБ-3.

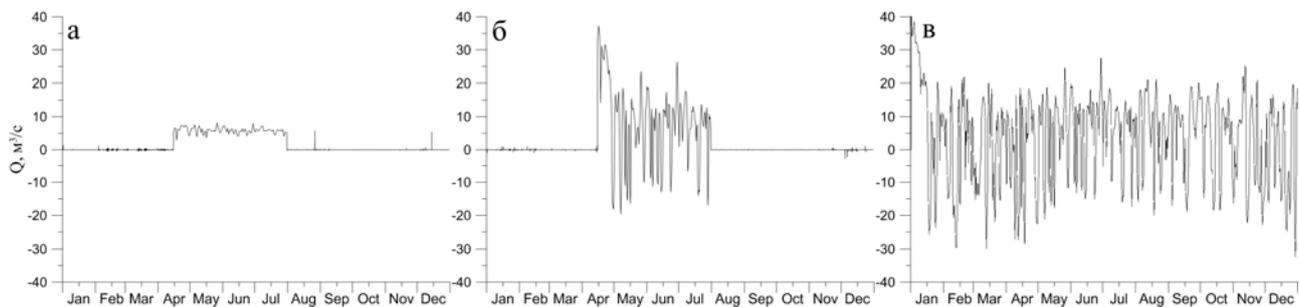


Рис. 6 – Изменчивость расходов воды, м<sup>3</sup>/с, в соединительном канале у выхода в лиман (поперечный разрез P1) при различных сценариях водообмена: а – ВБ-1; б – ВБ-2; в – ВБ-3 (положительные значения соответствуют направлению движения вод из моря в лиман).

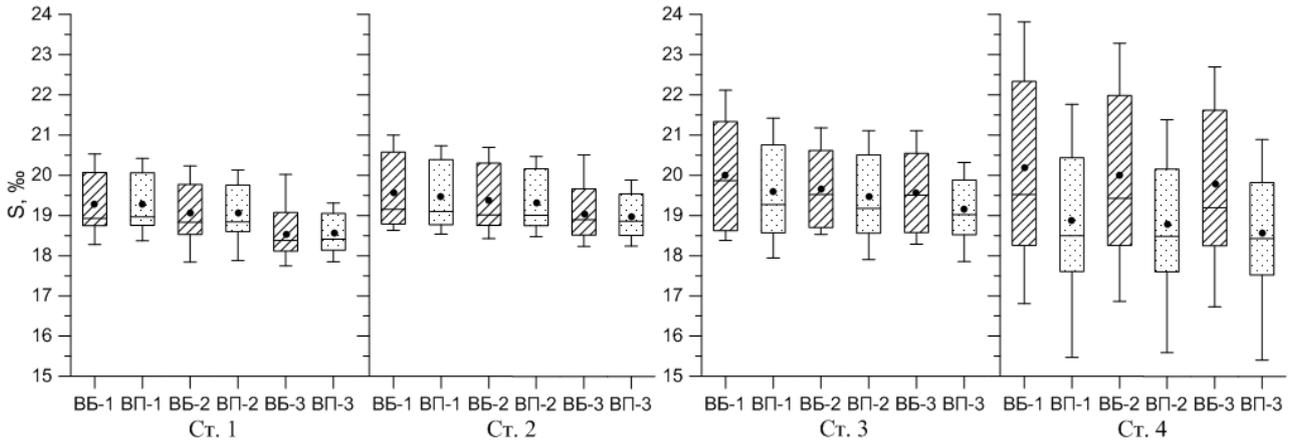


Рис. 7 – Результаты моделирования в различных частях Тилигульского лимана (точки Ст.1-Ст.4) пространственно-временной изменчивости солёности воды, ‰, в поверхностном 5-метровом слое при различных сценариях водообмена с морем, бытовым (ВБ) и природном (ВП) речном стоке. Приведены минимальные, максимальные, медианные и средние (точки) значения, а также значения 25% и 75% квантилей.

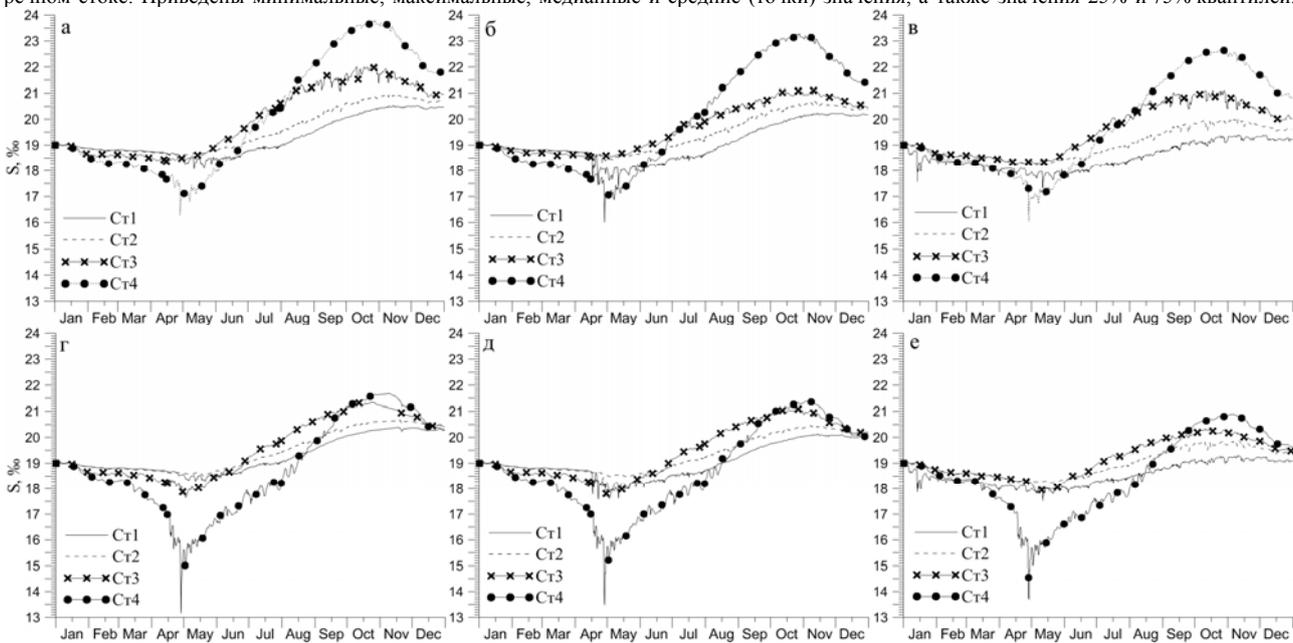


Рис. 8 – Временная изменчивость солёности, ‰, поверхностного слоя вод в реперных точках акватории лимана (Ст.1-Ст.4) при различных сценариях водообмена: а – ВБ-1; б – ВБ-2; в – ВБ-3; г – ВП-1; д – ВП-2; е – ВП-3

При восстановлении речного стока до объемов природного, максимальные значения солёности в летний период года (рис. 8д, е) будут наблюдаться в мелководной части акватории лимана, расположенной между поперечными разрезами Р3 и Р4 (Ст. 3, рис. 1).

Хотя вариант функционирования углубленного канала в течение всего года обеспечивает максимальное снижение солёности вод в лимане в целом, однако при сохранении современного уровня водохозяйственной деятельности в 2001-2040 гг., определяющей бытовой сток, тенденция многолетнего увеличения солёности в этот период также сохранится. Из рис. 8в, 9в видно, что значения солёности воды в реперных точках лимана в конце годового цикла все же выше, чем в его начале, хотя это повышение ми-

нимально среди всех рассмотренных вариантов функционирования углубленного канала. Сохранение межгодовой тенденции увеличения солёности воды в значительной мере является следствием морфологических особенностей строения ложа лимана [1, 13]: значительной его протяженности в меридиональном направлении, конфигурации береговой линии, распределения глубин вдоль акватории лимана, усложненности водообмена между различными частями лимана (вызванной наличием кос). Лишь восстановление природных объемов речного стока способно свести тенденцию увеличения солёности вод в лимане к минимуму.

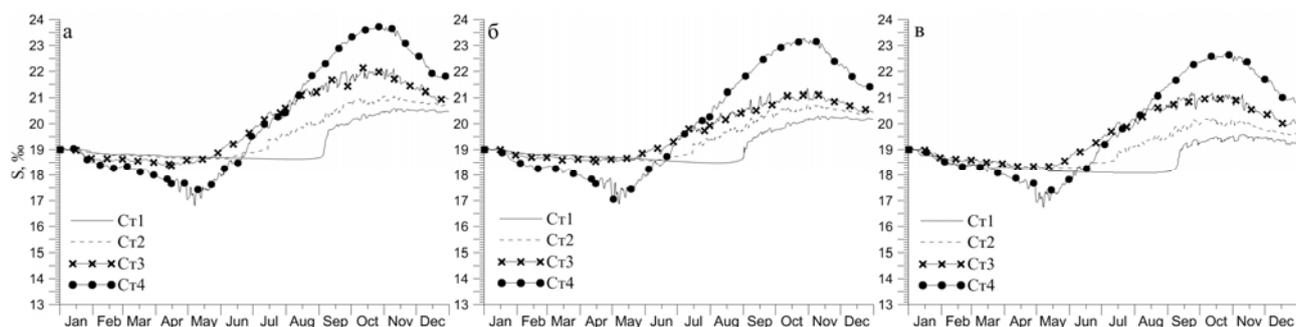


Рис. 9 – Временная изменчивость солёности, ‰, придонного слоя вод в реперных точках акватории лимана (Ст.1-Ст.4) при различных сценариях водообмена: а – ВБ-1; б – ВБ-2; в – ВБ-3.

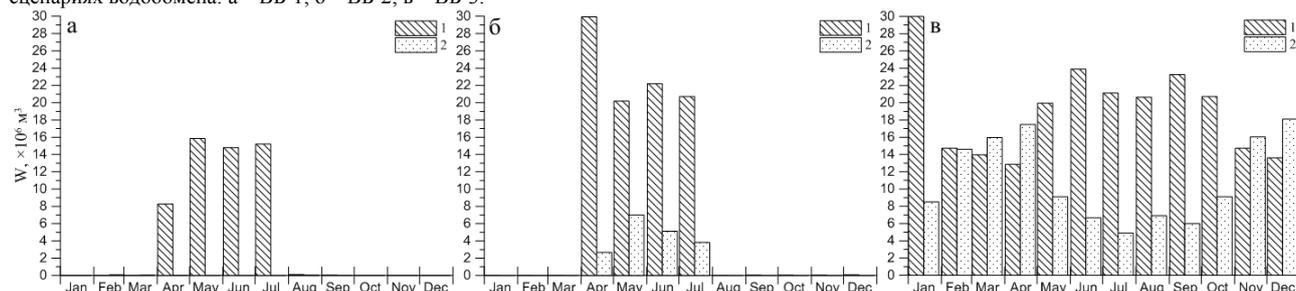


Рис. 10 – Объёмы воды,  $\times 10^6 \text{ м}^3$ , втекающие через соединительный канал в лиман (поперечный разрез P1) (1) и вытекающие из лимана в море (2) в течение расчетного года, при различных сценариях водообмена: а – ВБ-1; б – ВБ-2; в – ВБ-3.

Для сравнительной оценки эффективности вариантов ВБ-2 и ВБ-3 в отношении снижения темпов роста солёности вод в лимане было выполнено моделирование второго годового цикла, для которого, при неизменных прочих условиях, начальные значения температуры и солёности, отметки уровня воды в лимане задавались по результатам моделирования на последние сутки первого года. Сравнение средних за декабрь значений солёности в первый и второй год моделирования показало, что при углублении соединительного канала до отметки минус 2 м БС и функционировании его в апреле-июле, темпы роста солёности вод в лимане снизятся на 23 % по сравнению с современным вариантом, а при углублении и круглогодичной работе канала – на 50 % по сравнению с современным вариантом и на 34 % – по сравнению с вариантом работы углубленного канала только в апреле-июле.

Эффективность сравниваемых вариантов водообмена лимана с морем через соединительный канал, в отношении снижения темпов роста солёности вод, определяется объёмами воды, которые вытекают из лимана в море вместе с содержащимися в них солями. Приведенные на рис. 10 результаты свидетельствуют, что при углублении соединительного канала до отметки дна минус 2,0 м БС и постоянном его функционировании в течение года будет обеспечиваться максимальный выход воды из лимана в море. При этом за 5 лет из лимана в море вытечет количество воды равное объёму лимана. Однако следует учитывать, что водообмен через канал происходит в основном между морем и южной частью лимана,

где значения солёности меньше, чем на остальной его акватории, из-за смешения с морскими водами. Это снижает массу солей, выводимых из лимана в море, и обуславливает ее зависимость от интенсивности гидродинамического переноса и перемешивания вод в самом лимане.

## 6. ВЫВОДЫ

Результаты расчетов, полученные с использованием гидродинамической модели Delft3D-FLOW для метеорологических условий типового года современного климатического периода (2001-2041 гг.), свидетельствуют, что при современной глубине и режиме работы соединительного канала «лиман-море», объёмы поступления через него морских вод недостаточны для компенсации дефицита пресного баланса лимана, который формируется в результате интенсивного испарения летом.

При углублении соединительного канала до отметки дна минус 2,0 м БС (с площадью водного сечения  $56,7 \text{ м}^2$  при уровне воды минус 0,11 м БС), наполнение лимана до уровня моря после открытия канала будет происходить в течение двух декад. После этого водообмен лимана с морем становится разнонаправленным вследствие воздействия инициированных ветром сгонно-нагонных колебаний уровня воды в лимане и море. Это будет способствовать частичному выведению из лимана накопленных запасов солей.

Обеспечение непрерывной в течение года работы углубленного канала позволит уменьшить годовую амплитуду колебаний уровня воды в лимане при

более высокой среднегодовой отметке уровня, соответствующей уровню моря, а также будет способствовать уменьшению солености воды в лимане в результате интенсивного разнонаправленного водообмена через соединительный канал в течение всего года.

При функционировании углубленного канала только в апреле-июле, темпы роста солености вод в лимане снизятся на 23 % по сравнению с современным вариантом, а при круглогодичной работе канала – на 50 % по сравнению с современным вариантом и на 34 % – по сравнению с вариантом работы углубленного канала только в апреле-июле.

Хотя вариант функционирования в течение всего года углубленного канала обеспечивает максимальное снижение солености вод в лимане, однако, при сохранении в ближайший климатический период (до 2040 г.) современного уровня водохозяйственной деятельности на его водосборном бассейне, тенденция многолетнего увеличения солености вод в лимане все же сохранится. Лишь восстановление природных объемов речного стока в лиман способно свести тенденцию увеличения солености его вод к минимуму.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водні ресурси та гідроекологічний стан Тилігульського лиману: [монографія] / [Ю.С. Тучковенко, Н.С. Лобода, О.М. Гриб та ін.], за ред. Ю.С. Тучковенко, Н.С. Лободи. – Одеса: ТЕС, 2014. – 277 с.
2. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология: [монографія] / [В.В. Адобовский, Б.Г. Александров и др.]; ред. Ю.П. Зайцев, Б.Г. Александров, Г.Г. Миничева; Одесский филиал Ин-та биологии южных морей НАН Украины. - Киев: Наукова думка, 2006. – С.422-427.
3. Ковтун О.А. Фитобентос Тилигульского лимана (Черное море, Украина). Эколого-биологическая, морфологическая и таксономическая характеристика. – LAMBERT Academic Publishing. – 2012. – 353 с.
4. Loboda N., Bozhok Y. Impact of Climate Change on Water Resources of North-Western Black Sea Region. *International Journal of Research In Earth and Environmental Sciences*, 2015, vol. 02, no. 9, pp. 1-6.
5. Характеристика сучасного гідрохімічного та гідрологічного режиму лиману, вироблення рекомендацій щодо його поліпшення в складі ТЕР по об'єкту: «Розробка проектно-кошторисної документації з'єднувального каналу між Тилігульським лиманом і Чорним морем на території Комінтернівського району Одеської області»: Звіт з НДР заключний (наук. кер. Ю.С. Тучковенко), Од. держ. еколог. ун-т. – Одеса, 2015. – 267 с.
6. Deltares, 2014. Delft3D-FLOW, исходный код [Электронный ресурс] // Сообщество пользователей открытого программного обеспечения Delft3D. – Режим доступа: <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/> (01.12.2014 г.).
7. Deltares, 2013. *Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments – User Manual, version 3.15*. The Netherlands: Deltares systems (Delft). 702 p.
8. Gill A.E. *Atmosphere-Ocean Dynamics. International Geophysics Series*. New York, London: Academic Press, 1982, vol.30. 680 p.
9. Тучковенко Ю.С. Результаты адаптации модели DELFT3D-FLOW к условиям Тилигульского лимана / Ю.С. Тучковенко, Д.В. Кушнір // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2014. – № 18. – С. 164-174.
10. Комплексне управління водними ресурсами Тилігульського лиману та його гідроекологічний станом в умовах антропогенного впливу і кліматичних змін: Звіт з НДР заключний

(наук. кер.: Ю.С. Тучковенко), ДР № 0113U000696. Од. держ. еколог. ун-т. – Одеса, 2014. – 375 с.

11. Лобода Н.С. Вибір типових років в басейні Тилігульського лиману при розрахунках стоку за сценарієм M10 / Н.С. Лобода, Ю.С. Тучковенко, В.М. Хохлов, Ю.В. Божок, Н.Д. Отченаш // Лимани північно-західного Причорномор'я: сучасний гідроекологічний стан; проблеми водного та екологічного менеджменту, рекомендації щодо їх вирішення: матер. Всеукр. наук.-практ. конф. - Одеса, 2014. – С. 28-30.
12. Лонин С.А. Имитация стонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западной части Черного моря/ С.А. Лонин, Ю.С. Тучковенко // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 1999.–С. 58-66.
13. Тучковенко Ю.С. Моделирование ветровой циркуляции вод в Тилигульском лимане/ Ю.С. Тучковенко, Д.В. Кушнір // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2013. – № 16. – С. 149-158.

#### REFERENCES

1. Tuchkovenko Yu.S., Loboda N.S., Gryb O.M. et al. *Water resources and hydroecological conditions of the Tyligulskiy Lagoon*. Odessa: TES, 2014. 277 p. (Eds: Yu.S. Tuchkovenko, N.S. Loboda) (in Ukrainian).
2. Zaitsev Yu.P., Aleksandrov B.G., Minicheva G.G. (Eds.). *The North-Western part of the Black Sea: Biology and Ecology*. Kiev: Naukova Dumka, 2006, pp. 422-427. (in Russian).
3. Kovtun O.A. Fitobentos of the Tyligulskiy Liman Lagoon (the Black Sea, Ukraine). Eco-biological, morphological and taxonomical characteristics. LAMBERT Academic Publishing, 2012. 353 p. (in Russian).
4. Loboda N. Impact of Climate Change on Water Resources of North-Western Black Sea Region / N. Loboda, Y. Bozhok // *International Journal of Research In Earth and Environmental Sciences*, 2015, Vol 02, No. 9, pp. 1-6.
5. Tuchkovenko Yu.S. (scient. chief). Description of the modern hydrochemical and hydrological conditions of the lagoon, development of recommendations for its improvement. Part of technical-economic calculation on the project “Development of designing estimates for reconstruction of the connecting channel between the Tyligulskiy Liman Lagoon and the Black Sea in the area of Kominternivskiy district of Odessa Region”. Final Report, Odessa, OSENU, 2015. 267 p. (in Ukrainian).
6. *Deltares, 2014. Delft3D-FLOW, source-code*. Available at: <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/> (accessed December 1, 2014).
7. *Deltares, 2013. Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments – User Manual, version 3.15*. The Netherlands: Deltares systems (Delft). 702 p.
8. Gill A.E. *Atmosphere-Ocean Dynamics. International Geophysics Series*. New York, London: Academic Press, 1982, vol.30. 680 p.
9. Tuchkovenko Yu. S., Kushnir D. V. Results of the adaptation of DELFT3D-FLOW model to the conditions of the Tyligulskiy Liman Lagoon. *Visn. Odes. derz. ekol. Univ – Bulletin of Odessa state Environmental un-ty*, 2014, no. 18, pp. 164-174. (in Russian).
10. Tuchkovenko Yu.S. (scient. chief). Integrated management of water resources in the Tyligulskiy Liman Lagoon and its hydroecological conditions in the context of anthropogenic influence and climate change. Final Report, No. 0113U000696, Odessa, OSENU, 2014. 375 p. (in Ukrainian).
11. Loboda N. S., Tuchkovenko Yu. S., Khokhlov V. M., Bozhok Yu. V., Otchenash N. D. Proc. All-Ukrainian scient.-pract. conf. “Lagoons of the North-Western Black Sea Coast: current hydroecological conditions; problems of the water and environmental management, recommendations for their resolving”. Odessa, OSENU, October 1-3, 2014, pp. 28-30 (in Ukrainian).
12. Lonin S. A., Tuchkovenko Yu. S. Simulation of the inflow-outflow oscillations of the sea water level in the ports of the North-Western part of the Black Sea. Proc. of the Sea Hydrophysical Institute of National Academy of Science of Ukraine “Environmental safety of coastal and shelf zone and integrated usage of shelf resources”, Sevastopol, National Academy of Science of Ukraine, 1999,

- pp. 58-66. (in Russian).  
13. Tuchkovenko Yu. S., Kushnir D. V. Modelling of the wind-induced circulation of waters in the Tyligulskyi Liman Lagoon,

*Visn. Odes. derž. ekol. univ.*, 2013, No 16, pp. 149-158. (in Russian).

**ESTIMATION OF THE INFLUENCE  
OF WATER EXCHANGE WITH THE SEA CONDITIONS  
ON THE WATER LEVEL AND SALINITY VARIABILITY  
IN THE TYLIGULSKYI LIMAN LAGOON**

**Yu. S. Tuchkovenko**, Doctor of Geographical Sciences,  
**D. V. Kushnir**,  
**N. S. Loboda**, Doctor of Geographical Sciences

<sup>1</sup> *Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, science@odeku.edu.ua*

The potentialities of averting a further salinization of the Tyligulskyi Liman lagoon were identified on the basis of the results of the hydrodynamic modelling, using the numerical model Delft3D-FLOW. The means to prevent the salinization in the lagoon include a reconstruction of the “lagoon-sea” interconnecting channel and the changing of its operational schedule, as well as the increasing of the river inflow considering the climatic conditions of the first half of the XXI century. The results of the verification of the hydrodynamic model are given. It is shown that for stabilizing water levels and reducing the rate of the water salinity in the lagoon the most effective option is the year-round operation of the deepened “lagoon-sea” connecting channel. This will be facilitated by a multi-directional exchange of water through the channel caused by wind-induced water level oscillations in the lagoon and in the sea. However, while maintaining the current level of the water management activity in the catchment area of the lagoon, a long-term trend of increasing water salinity in the lagoon still remains. Only the restoration of natural river discharge into the lagoon could reduce the tendency of growing water salinity to a minimum.

**Keywords:** the Tyligulskyi Liman lagoon; water exchange with the sea; water salinity; hydrodynamic modelling.

**ОЦІНКА ВПЛИВУ УМОВ ВОДООБМІНУ З МОРЕМ НА МІНЛИВІСТЬ  
РІВНЯ І СОЛОНОСТІ ВОДИ В ТИЛІГУЛЬСЬКОМУ ЛИМАНІ**

**Ю. С. Тучковенко**, д.геогр.н.,  
**Д. В. Кушнір, Н. С. Лобода**, д.геогр.н.

<sup>1</sup> *Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, science@odeku.edu.ua*

На підставі результатів гідродинамічного моделювання з використанням чисельної моделі Delft3D-FLOW визначені можливості запобігання подальшого засолення Тилигульського лиману шляхом реконструкції з'єднувального каналу «лиман-море» та зміни регламенту його функціонування, а також шляхом збільшення річкового стоку в лиман, з урахуванням кліматичних умов у першій половині XXI ст. Наведено результати верифікації гідродинамічної моделі. Показано, що для стабілізації рівня води та зменшення темпів зростання солоності вод у лимані найбільш ефективним є варіант цілорічного функціонування поглибленого з'єднувального каналу «лиман-море». Цьому сприятиме різноспрямований водообмін через канал, обумовлений коливаннями рівня води у лимані і морі, що викликані вітром. Однак, при збереженні сучасного рівня водогосподарської діяльності на водозбірному басейні лиману тенденція багаторічного збільшення солоності його вод все ж збережеться. Лише відновлення природних обсягів річкового стоку в лиман здатне звести тенденцію збільшення солоності його вод до мінімуму.

**Ключові слова:** Тилигульський лиман, водообмін з морем, солоність вод, гідродинамічне моделювання.

*Дата першого подання:* 18.10.2015

*Дата надходження остаточної версії :* 20.11.2015

*Дата публікації статті:* 26.11.2015