

УДК 551.468.4

В.А.Иванов¹, Е.Д. Гопченко², Ю.С. Тучковенко², Н.Г. Сербов²,
Г.Д. Бузиян³

¹*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь*

²*Одесский государственный экологический университет, г. Одесса*

³*Одесское областное управление по водному хозяйству, г. Одесса*

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ВОД ПРИЧЕРНОМОРСКИХ ЛИМАНОВ И ПРИДУНАЙСКИХ ОЗЕР ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОДНОГО БАЛАНСА

Представлены результаты и обобщен опыт использования математических моделей для решения задач водного и экологического менеджмента морских и пресноводных водоемов с искусственно поддерживаемым и регулируемым водообновлением (на примере Тузловской группы Причерноморских лиманов и озер Ялпуг-Кугурлуй Придунайской озерной системы).

Введение. Северо-западное Причерноморье характеризуется наличием большого числа лиманов, связь которых с морем регулируется через каналы искусственного происхождения либо поддерживается эпизодически под влиянием природных факторов [1]. Качество вод в таких лиманах определяется разницей между приходной и расходной частями водного баланса для лет различной водности, наличием и интенсивностью водообмена с морем, качеством вод малых рек, впадающих в лиман, и бокового стока. Поскольку в последние десятилетия сток большинства малых рек, впадающих в Причерноморские лиманы, в результате антропогенной деятельности существенно уменьшился, то имеет место нарушение водного режима лиманов с затрудненным водообменом с морем в сторону роста дефицита воды и, как следствие, их обмеление.

Уменьшение объема вод лиманов, вызванное интенсивным испарением в летний период, приводит к росту концентрации загрязняющих веществ, солености, интенсификации процесса эвтрофикации, зарастанию лиманов водорослями-макрофитами, нарушению жизнедеятельности флоры и фауны. Особенно ярко этот процесс проявляется в маловодные (в масштабах водосбора) годы. Ухудшение качества вод лиманов и их обмеление приводят к загрязнению и осушению лечебных донных илов, т.е. к потере их бальнеологического потенциала. Значительные колебания отметок уровней воды и ее солености в лиманах, вызванные притоком паводочных вод весной и превышением испарения над осадками и стоком малых рек – летом, вызывают нестабильность динамики функционирования водных экосистем, их экологического состояния, продуктивности, условий для рыбоводства.

Наиболее эффективным способом стабилизации гидрологического и гидрохимического режимов лиманов, управления их экологическим состоянием является обеспечение и регулирование искусственного водообмена с открытым морем. К числу Причерноморских лиманов, для

которых указанные проблемы наиболее актуальны, следует отнести Дофиновский, Тилигульский, Будаковский, Тузловские лиманы.

Схожие проблемы свойственны и многим из озер Нижнего Дуная (Придунайским): Ялпуг, Кугурлуй, Кагул, Китай и Катлабух. Качество вод этих озер в настоящее время определяется регулируемым водообменом с р.Дунай. До 60-х годов прошлого века озера ежегодно наполнялись водой во время паводков на Дунае и осушались при падении уровней воды в Дунае до отметок порогов. Вместе с водой из озер удалялись и излишки солей, загрязняющие вещества, органика, что препятствовало их накоплению.

В настоящее время водообмен с р.Дунай происходит самотеком через шлюзованные каналы, причем уровень воды в озерах регулируется правилами эксплуатации, в соответствии с которыми он ограничивается верхними (НПУ) и нижними (УМО) значениями их наполнения и сработки, установленными исходя из требований отраслевых водопользователей, прежде всего, к минерализации вод без учета других экологических параметров. Правила эксплуатации водоемов следующие: для обеспечения водообновления в конце осени – начале зимы, когда в р.Дунай наблюдаются низкие уровни, через шлюзы производится сброс минерализованных и загрязненных вод озер в р.Дунай практически до УМО (уровня мертвого объема). В период весенне-летних паводков и, если позволяют уровни р.Дунай, до мая-июня производится наполнение водоемов слабоминерализованной дунайской водой. После чего шлюзы закрываются и водоем вступает в фазу простоя. При таком режиме водохозяйственной эксплуатации степень наполнения и сработки объема озер зависит от режима уровней р.Дунай и, таким образом, качество вод в водоеме во многом определяется водностью года (по р.Дунай) и не является полностью регулируемым. В маловодные годы, когда нельзя обеспечить наполнение озер дунайской водой до НПУ и увеличивается забор воды из озер на орошение, имеет место повышение минерализации и ухудшение качества воды в озерах.

Таким образом, гидрохимический режим Придунайских озер в большой степени зависит от объемов наполнения и сработки озер, которые в свою очередь ограничены их полезными объемами. Следовательно, актуальной является задача регулирования приходной и расходной составляющих водного баланса озер в целях установления оптимальных отметок НПУ и УМО для поддержания качества воды в водоемах.

Цель данной работы заключается в представлении результатов и обобщении опыта использования математических моделей для решения задач водного и экологического менеджмента морских и пресноводных водоемов с искусственно поддерживаемым и регулируемым водообновлением (на примере Тузловской группы Причерноморских лиманов и озер Ялпуг-Кугурлуй Придунайской озерной системы).

Ранее проблемы оптимизации приходной и расходной составляющих водно-солевого баланса указанных озер для поддержания оптимального (в отношении минерализации и эвтрофикации) качества их вод были рассмотрены в работах [2, 3]. Вопросы стабилизации гидрологического и,

как следствие, гидрохимического режимов Тузовских лиманов обсуждались в работах [4-5].

Исходные материалы и методика расчета. В работе использовались модели водно-солевого баланса Тузовских лиманов и системы озер Ялпуг-Кугурлуй. Подробное описание методов оценки приходных и расходных балансовых составляющих этих водоемов, а также использованных исходных материалов приведено в работах [2] и [6]. Заметим только, что при расчетах для Тузовской группы лиманов использовались данные батиметрической съемки и материалы полевых экспедиций, проведенных в 2003-2004 гг. Одесским государственным экологическим университетом, обобщенные наблюдения Дунайской гидрометеорологической обсерватории, а также данные других исследователей, взятые из литературных источников [7, 8].

Помимо модели водно-солевого баланса, при расчетах изменчивости гидрологических характеристик и водообмена с морем Тузовских лиманов использовалась трехмерная нестационарная гидродинамическая модель [9].

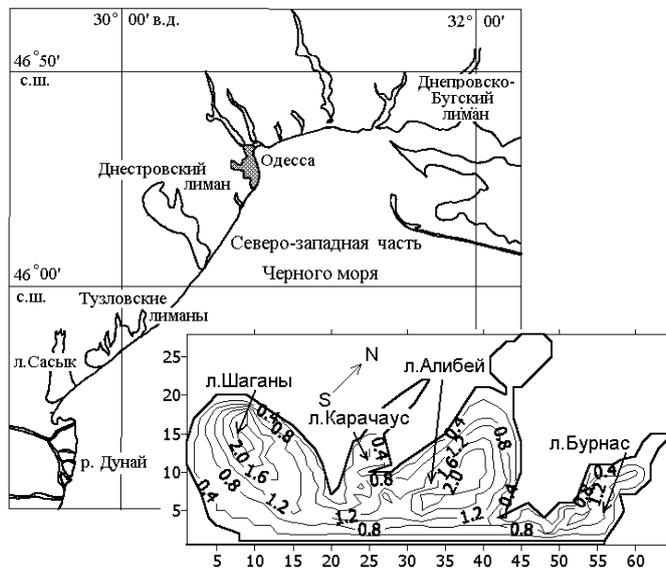
Для оз. Ялпуг-Кугурлуй использовались данные наблюдений ГМС Болград, фондовые материалы Одесского Облводхоза, а также данные экологического мониторинга, выполненного в рамках проекта «Озера нижнего Дуная» программы ТАСИС (2001-2002 гг.). На основе модели водного баланса для озер была разработана точечная модель эвтрофикации вод, подробно описанная в [10].

Следует отметить, что при водно-балансовых расчетах для исследуемых водоемов водообмен лиманов с морем, а также приток дунайской воды в озера (весной) и ее сток в реку (осенью), оценивались как остаточные члены балансовых уравнений.

Рекомендации для водно-экологического менеджмента Тузовских лиманов. Тузовская группа лиманно-лагун, расположенная в центральной части Дунай-Днестровского междуречья, относится к типу мелководных, периодически открытых водоемов (рис. 1). В ее составе выделяют три основных лимана: Шаганы, Алибей, Бурнас и ряд более мелких. Водоем отделен от прилегающей акватории моря песчаной косой-пересыпью, которая может частично размываться весной и осенью, в период сильных штормов. Кроме того, для нужд рыболовства в пересыпи создаются искусственные, периодически открываемые каналы, число которых может меняться.

Современный режим рыбохозяйственной эксплуатации Тузовских лиманов предполагает обязательное открытие каналов весной – для впуска мальков кефали из моря в водоем, и осенью – для отлова кефали в каналах при выходе ее из лиманов в море. В летний период (июнь-сентябрь) лиманы изолируются от моря для предотвращения ухода кефали в море. Во время летней изоляции, за счет преобладания испарения над осадками, уровень лимана понижается на 20 - 50 см по сравнению с уровнем моря, а в экстремально маловодные годы – до 90 см. При этом соленость вод лиманов повышается до 35 - 40 ‰. Если в оставшуюся часть года не обеспечить наполнение лиманов путем поступления морских вод, то может произойти засоление и обмеление водоема до критических значений.

Основными природными факторами, формирующими водный и солевой баланс Тузовской группы лиманов, являются поверхностный (склоновый и речной) сток, осадки и испарение, водообмен с открытым морем через искусственные каналы и естественные прорвы. Роль притока подземных вод и фильтрации морских через пересыпь мала по сравнению с водообменом через прорвы и каналы.



Р и с. 1. Расположение и батиметрическая карта расчетной области Тузовских лиманов

Уравнение водного баланса лиманов записывается в виде:

$$\frac{dW_{\text{л}}}{dt} = Q_{\text{о}} + Q_{\text{пов}} - Q_{\text{и}} \pm Q_{\text{л-м}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{л}}$ – объем вод Тузовских лиманов; $Q_{\text{о}}$ – поступление воды в виде осадков; $Q_{\text{пов}}$ – поверхностный сток (склоновый и речной); $Q_{\text{и}}$ – потери воды на испарение; $Q_{\text{л-м}}$ – водообмен между лиманами и морем через искусственные каналы и естественные прорвы.

Результаты расчетов водно-солевого баланса группы Тузовских лиманов, подробно описанные в [4, 6], подтвердили, что исторически сложившийся режим их рыбохозяйственного использования, предполагающий принудительное обеспечение водообмена с морем через соединительные каналы весной и в начале осени, является оптимальным и

необходимым для сохранения современного хозяйственного статуса и экологического состояния водоема. По этим каналам происходит искусственное наполнение водоема морской водой, которая способствует относительному «распреснению» вод лиманов осенью и, в маловодные годы, весной. В условиях средневодного (т.е. типичного) года из лиманов, в период весеннего водообмена с морем, выводится большее количество солей, чем поступает осенью с морскими водами (870 и 700 т, соответственно). Лишь обеспечение стабильной периодической искусственной связи лиманов с морем позволяет поддерживать соленость их вод в пределах 20-40 ‰. В маловодные годы, за период летней изоляции (июнь-сентябрь), соленость вод лиманов увеличивается с 25.5 до 51 ‰. В случае двух последовательных маловодных лет, при отсутствии водообмена с морем, соленость лиманных вод может повыситься до 200 ‰, т.е. до уровня, наблюдаемого в 30-х годах XIX-го века.

Поскольку водообмен с открытым морем через соединительные каналы в пересыпи играет важную роль в стабилизации гидролого-гидрохимического режима лиманов и существенно влияет на их экологическое состояние, то актуальной представляется задача разработки научно-обоснованных рекомендаций по численности, расположению, параметрам и режиму эксплуатации этих каналов.

В работе [4] с помощью гидродинамической модели [9] была решена задача определения численности и местоположения соединительных каналов для обеспечения максимального водообмена с морем и обновления вод Тузовского водоема. Расчеты показали, что наиболее эффективным является сооружение двух соединительных каналов, расположенных на южной (Шаганы) и северной (Бурнас) оконечностях песчаной косы. Между этими точками водоема в 70-80 % случаев ветровых ситуаций образуется существенный перекоп водной поверхности. Кроме того, условно водоем можно разделить на две части, водообмен между которыми затруднен – это Бурнас и Шаганы-Алибей. Следовательно, чтобы обеспечить водообновление в обеих частях водоема, необходимо иметь соединительный канал в каждой из них.

Не менее важная задача водного менеджмента лиманов заключается в определении оптимального размера соединительных каналов, исходя из цели управления – стабилизации гидрологического и гидрохимического режимов Тузовских лиманов, а также минимизации затрат для достижения этой цели.

Исследовались два основных сценария водопользования, позволяющие достигнуть цели управления:

- сохранение современного режима рыбохозяйственного использования лиманов путем наполнения в осенне-зимний период морской водой через стационарные искусственные прораны в пересыпи;
- реконструкция гидрологического и гидрохимического режимов лиманов путем обеспечения непрерывного водообмена с морем в летний период через постоянно функционирующие искусственные прораны в пересыпи.

При моделировании первого сценария исследовалась скорость нерегулируемого наполнения и относительного распределения Тузловских лиманов в период с третьей декады сентября до конца года за счет водообмена с морем через два канала, расположенных в противоположных концах пересыпи. Поскольку для обеспечения необходимой пропускной способности каналов мы не можем варьировать их глубиной (она лимитируется глубинами ≈ 0.5 м со стороны лимана и моря в месте расположения каналов), то задача заключалась в определении оптимальной ширины этих каналов.

При расчетах акватория Тузловских лиманов покрывалась сеткой 65×22 узла с шагом 500 м (рис. 1). Учитывая малые глубины, использовались 4 расчетных уровня по вертикали. Для учета влияния на водообмен с морем стонно-нагонных колебаний уровня воды в лиманах, расчеты проводились при ветровых условиях, наблюдаемых в 2002 году на ГМП Усть-Дунайск. При этом отметка уровня воды в каналах со стороны моря задавалась неизменной. Рассматривались два случая превышения отметки уровня моря над отметкой уровня воды в водоеме к концу летнего периода изоляции: на 20 и 50 см. Соленость вод в лиманах в начальный момент полагалась равной 39 ‰, а соленость втекающих морских вод задавалась равной 15 ‰.

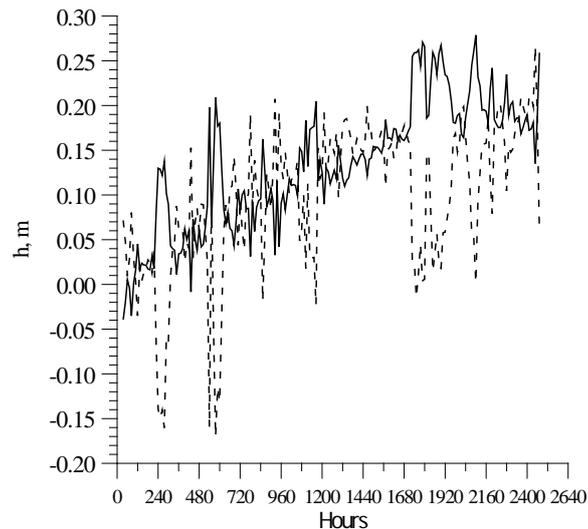
Поскольку, как отмечалось ранее, водообмен между лиманом Бурнас и остальной, значительно большей частью водоема, затруднен, то исходя из соотношения объемов вод двух указанных частей водоема, можно предположить, что для распределения л.Бурнас понадобится соединительный канал значительно меньшей ширины, чем в южной части водоема (л.Шаганы).

В ходе рекогносцировочных исследований на местности были обнаружены остатки сильно обмелевшего искусственного канала шириной 5 м, соединяющего ранее л. Бурнас с морем. Исходя из требования минимизации затрат на строительство каналов и опыта рыбохозяйственного использования лиманов, в первой серии численных экспериментов ширина обоих каналов задавалась равной 5 м. Каналы располагались в узлах (15, 1) и (54,1) расчетной сетки (см. рис. 1).

Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3. Следует обратить внимание на следующие особенности. При указанной ширине проливов заполнение лиманов морской водой до отметки уровня моря происходит до начала - середины декабря. Под действием господствующих в осенне-зимний период года ветров северных румбов, между северной и южной частями водоема в течение расчетного периода образуются экстремальные перепады уровня (рис. 2), которые способствуют водообмену лиманов с морем. К концу расчетного периода соленость вод в лимане Бурнас понижается до 24 ‰, в то время как в лиманах Шаганы и Алибей – лишь до 34 ‰.

Приведенные результаты расчетов свидетельствуют, что два канала шириной в 5 м, расположенные в северной и южной частях пересыпи, обеспечивают значительное распределение вод в л.Бурнас, но не достаточны для эффективного распределения остальной части водоема. Следовательно, в

силу указанных ранее причин, ширина южного канала должна быть увеличена. Результаты расчетов изменчивости солености вод в лиманах при различной ширине канала в л. Шаганы приведены на рис. 3.

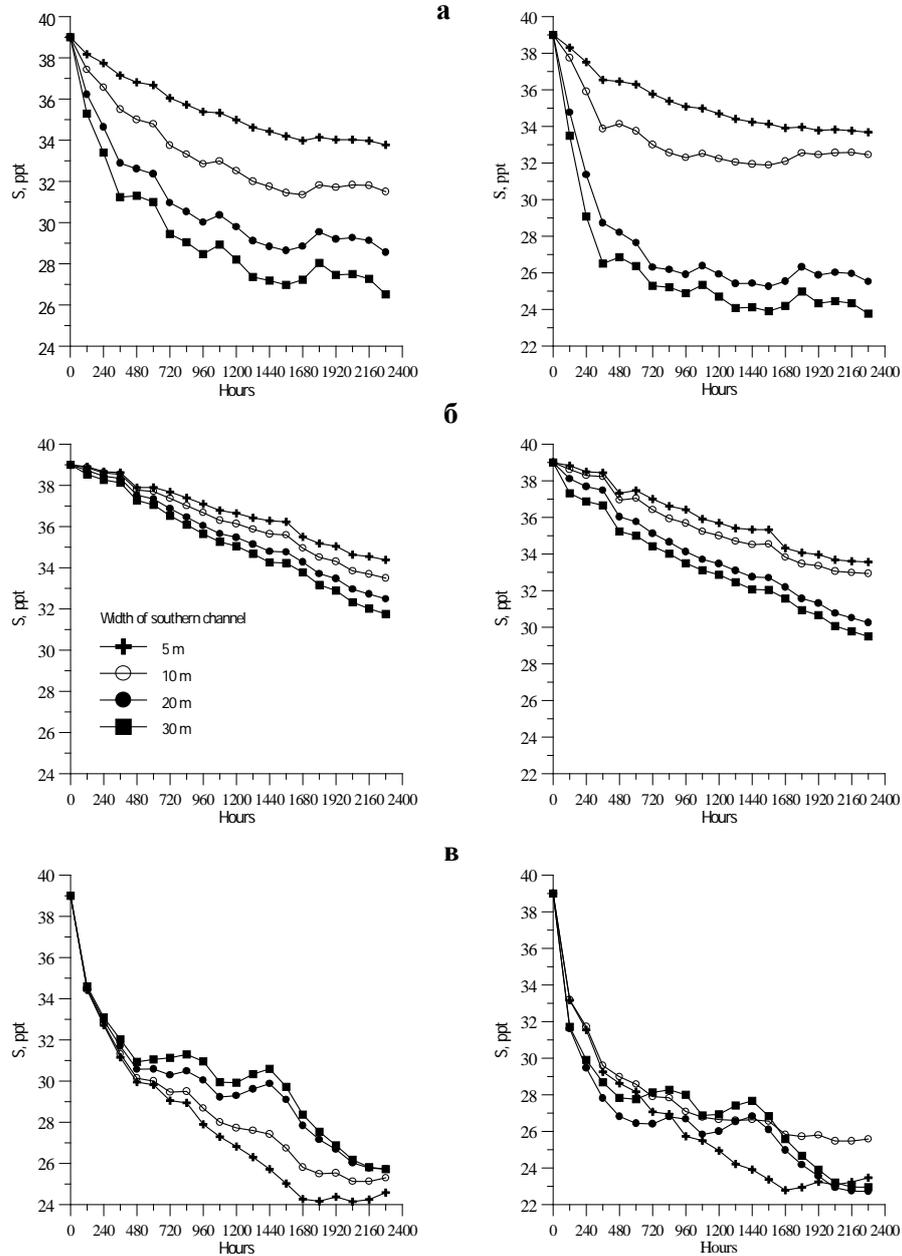


Р и с. 2. Изменчивость отметок уровней воды (в м) в лиманах Бурнас (пунктир) и Шаганы (сплошная кривая) за период с 21 сентября по 31 декабря при наличии 2-х каналов шириной 5 м в пересыпи и начальном превышении отметки уровня моря 0.2 м

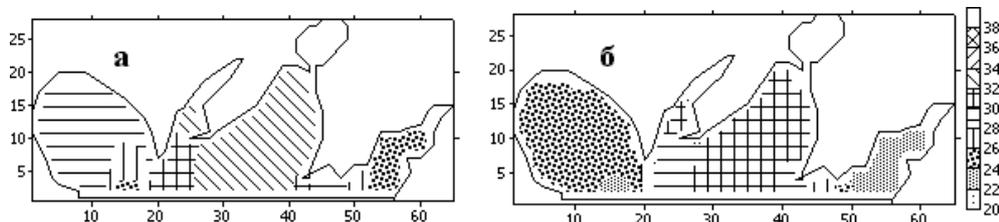
Видно, что наиболее эффективным является увеличение ширины южного канала до 20 м. При дальнейшем увеличении ширины до 30 м соленость вод в лиманах понижается лишь на несколько промилле. Максимальные значения в пространственном распределении солености отмечаются в лимане Алибей (рис. 4). Увеличение ширины северного канала (в л. Бурнас) до 10 м приводит к снижению солености вод в этом лимане до 21 ‰, но лишь незначительно влияет на соленость вод в л. Алибей и Шаганы (рис. 5).

Таким образом, расчеты для первого сценария водопользования показали, что для наполнения водоема в осенне-зимний период в течение 3-4 декад, оптимальным является сооружение 2-х каналов: шириной 5 м – в л. Бурнас и 20 м – в л. Шаганы. При начальном перепаде отметок уровня воды в море и лиманах 0.5 м скорость течения в каналах в момент их открытия может достигать 2 м/с, но при стабилизации уровня – не превышает 1 м/с.

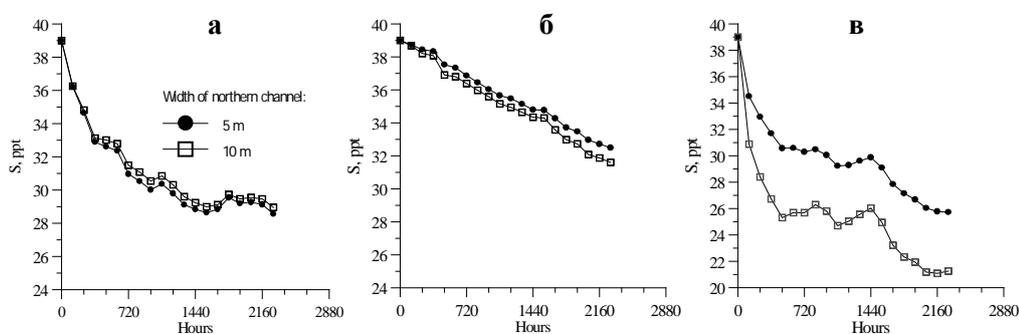
Исходя из полученных результатов, проводились расчеты для второго сценария водопользования, когда каналы указанной выше ширины остаются открытыми весь летний период для компенсации падения уровней в водоеме и осолонения его вод за счет испарения. Расчет велся с 1 мая по 30 сентября при ветровых условиях 2002 г.



Р и с. 3. Изменчивость солености вод в лиманах Шаганы (а), Алибей (б), Бурнас (в) в период с 21 сентября по 31 декабря при начальном превышении отметки уровня моря над невозмущенным уровнем воды в водоеме равном 0.2 м (слева) и 0.5 м (справа) и наличии 2-х каналов в пересыпи: шириной 5 м – в лимане Бурнас; 5, 10, 20, 30 м – в лимане Шаганы



Р и с. 4. Соленость вод в Тузовских лиманах в конце декабря при наличии двух каналов: шириной 5 м – в л. Бурнас и 20 м – в л. Шаганы при начальном превышении отметки уровня моря 0.2 м (слева) и 0.5 м (справа)

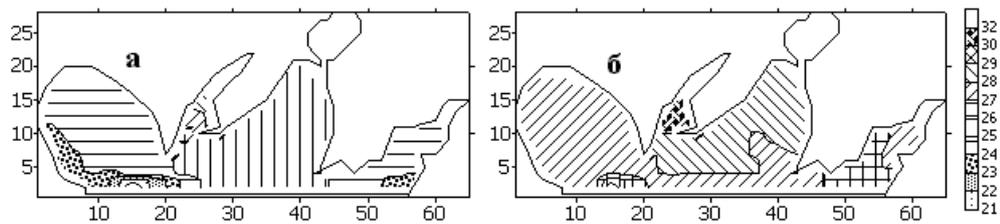


Р и с. 5. Изменчивость солености вод в лиманах Шаганы (а), Алибей (б), Бурнас (в) за период с 21 сентября по 31 декабря при начальном превышении отметки уровня моря 0.2 м и ширине канала в л. Шаганы 20 м, а в л. Бурнас – 5 и 10 м

На морских концах каналов задавались возмущения уровня моря, рассчитанные при аналогичных ветровых условиях по модели адаптированной к акватории прилегающей части Черного моря [4, 6]. Соленость вод на морских границах задавалась однородной и, в соответствии с данными атласа [8], увеличивалась с 12 ‰ в мае до 15 ‰ – в сентябре. Начальная (в мае) соленость вод в Тузовском водоеме, согласно [7], полагалась равной 21 ‰, а распределение ее по пространству водоема – однородным. Предполагалось, что за расчетный период максимальная глубина водоема уменьшится за счет испарения на 0.9 м по сравнению с исходной (3.4 м) – в начале мая, что соответствует ситуации экстремально маловодного года в водно-балансовых расчетах. Отметим, что в работе [4] такие расчеты выполнялись для каналов шириной 50 м.

Ранее выполненные для заданных условий расчеты, при отсутствии водообмена лиманов с морем, показали [4], что минерализация вод к середине сентября повысится на акватории лиманов Шаганы и Алибей до 38.4-38.7 ‰, а в лиманах Карачаус и Бурнас – до 43.4 и 43.7 ‰, по сравнению с весенней (21 ‰), когда существует естественный водообмен с

морем. Моделирование случая функционирования в летний период двух соединительных каналов определенной ранее ширины (северного – 5 м и южного – 20 м) показало, что соленость вод в середине сентября в лиманах Шаганы и Бурнас составит 26 - 28 ‰, в л. Алибей 28-29 ‰ и лишь в л. Карачаус превысит 30 ‰ (рис. 6).



Р и с. 6. Соленость вод Тузовских лиманов в конце июля (а) и середине сентября (б) при функционировании в летний период двух каналов: шириной 5 м – в лимане Бурнас и 20 м – в лимане Шаганы

Расчеты, выполненные с помощью гидродинамической модели, в которых соленость вод Тузовских лиманов рассматривалась как показатель качества вод водоема по сравнению с морскими водами, показали, что для стабилизации гидрологического и гидрохимического режимов лиманов, путем обеспечения водообмена с морем, оптимально строительство двух каналов в песчаной пересыпи: в л. Бурнас (северный) – шириной 5 м и л. Шаганы (южный) – шириной 20 м. Глубина каналов 0.5 м. При этом удастся избежать чрезмерного обмеления и осолонения Тузовских лиманов в летний период, особенно в маловодные годы.

Рекомендации по управлению качеством вод Придунайских озер.

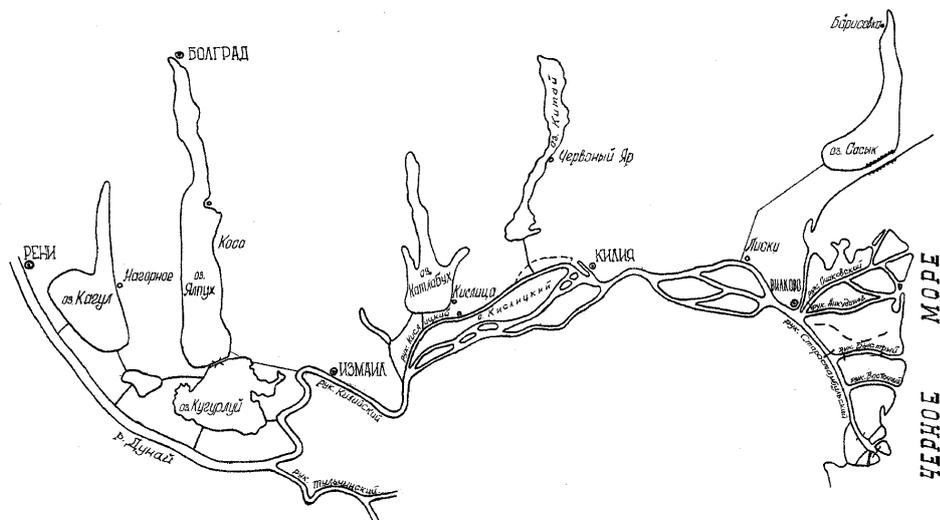
Придунайские озера, расположенные в украинской части дельты реки Дунай (рис. 7), являются источником водоснабжения прилегающих населенных пунктов и в большой степени определяют развитие в данном регионе орошаемого земледелия и рыбного хозяйства. В настоящее время водный режим водоемов определяется поступлением воды за счет осадков, стоком малых рек, испарением с поверхности водоемов и самотечным водообменом с р. Дунай через каналы.

Озера Ялпуг-Кугурлуй – самый крупный водоем Придунайской озерной системы. Уравнение водного баланса водоема записывается в виде:

$$\frac{dW}{dt} = Q_{pr} + Q_{gr} + Q_{dr} + Q_d^{in} + Q_b + Q_{jr} - Q_{ev} - Q_f - Q_{tr} - Q_{ir} - Q_d^{out}, \quad (2)$$

где W – объем вод водоема; t – время; Q_d^{in} , Q_{pr} , Q_{gr} , Q_{dr} , Q_b – приток вод в водоем из р. Дунай, в результате выпадения атмосферных осадков,

поступления грунтовых, дренажных и коммунально-бытовых вод, бокового притока с прилегающих территорий ($S = 1220 \text{ км}^2$), стока реки Ялпуг ($S = 3180 \text{ км}^2$), соответственно; Q_{ev} , Q_f , Q_{tr} , Q_{ir} , Q_d^{out} – потери воды на испарение, фильтрацию по периметру водоема, транспирацию надводной и полупогруженной водной растительности, забор на орошение и коммунально-бытовое потребление (из северной части оз.Ялпуг), сброс воды в р.Дунай, соответственно.

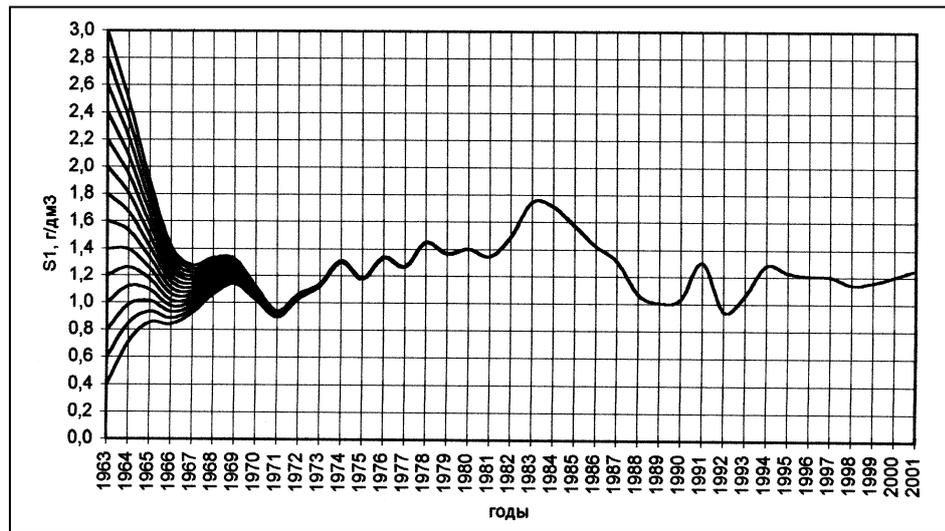


Р и с. 7. Схема расположения Придунайских озер

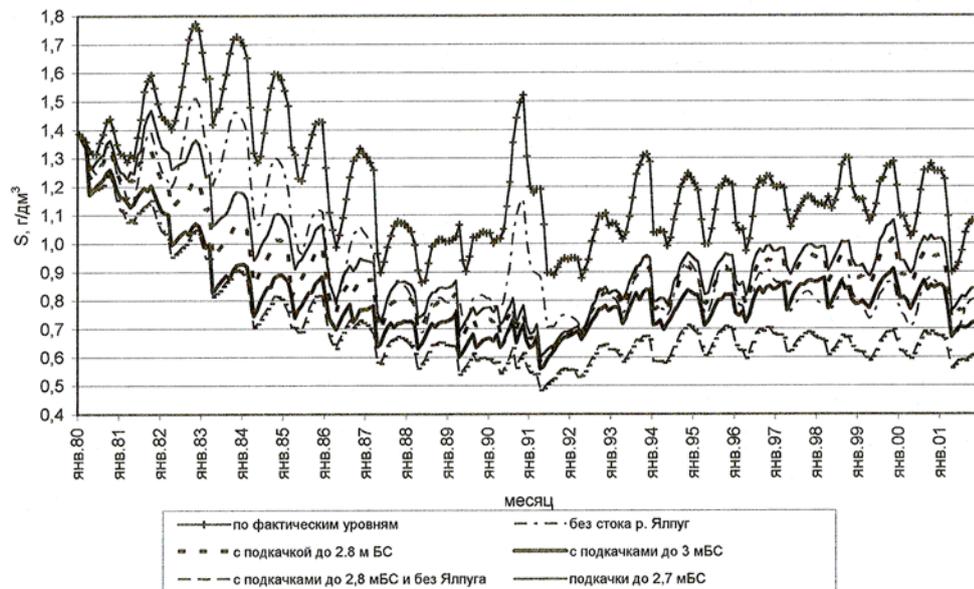
Минерализация вод озер зависит от возможности их наполнения слабоминерализованной ($\approx 0,4 \text{ г/дм}^3$) дунайской водой, которая в свою очередь определяется перепадом уровней воды между р.Дунай и водоемом, т.е. водностью р.Дунай. Имели место случаи, когда из-за очень низких уровней воды на Дунае наполнение озер не производилось в течение всего года и уровни воды в водоеме понижались на 70-80 см ниже УМО. Наоборот, в многоводные на Дунае годы весьма проблематичным является сброс минерализованных вод озер в р.Дунай.

Результаты моделирования водно-солевого баланса оз. Ялпуг-Кугурлуй в условиях самотечного водообмена при современных отметках НПУ = 2.8 мБС и УМО = 1.5 мБС в период с 1963 по 2001 гг., приведенные в [2], свидетельствуют, что даже при самом благоприятном уровненом режиме р.Дунай достигнуть оптимальных для ирригационных целей величин минерализации вод озер (около $1,0 \text{ г/дм}^3$) в течение вегетационного периода (май-сентябрь) удастся только в многоводные годы (рис. 8). Решить проблему можно либо путем усовершенствования гидротехнических сооружений водоема, в частности, строительства насосных станций, которые дадут возможность поддерживать оптимальные диспетчерские

режимы воды в озерах (НПУ), независимо от уровня воды в р. Дунай, путем подкачки воды в водоем.



Р и с. 8. Изменчивость минерализации вод оз.Ялпуг-Курурлуй, полученная при моделировании на временном отрезке 1963-2001 гг.



Р и с. 9. Изменчивость минерализации вод оз.Ялпуг-Кугурлуй, полученная при разных условиях моделирования водно-солевого баланса за период с 1980 по 2001 гг.

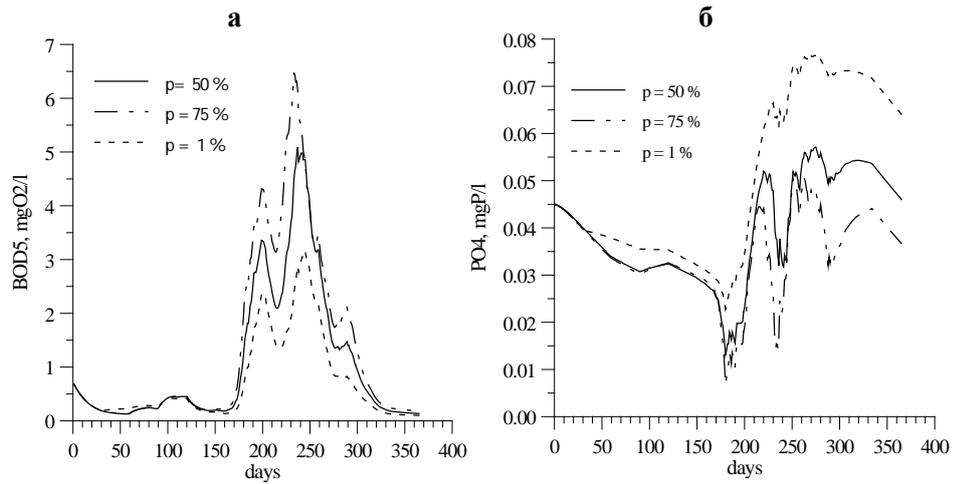
Моделирование водно-солевого баланса оз. Ялпуг-Кугурлуй с учетом подкачки слабоминерализованной дунайской воды в озеро в вегетационный период показало (рис. 9) [3], что желательно увеличить УМО с 1,5 до 1,8-1,9 мБС (чтобы избежать падения уровня воды в маловодные годы ниже 1 мБС), а НПУ поддерживать за счет подкачки воды на уровне 2,7-3,0 мБС (независимо от водности р. Дунай). При этом варианте управления можно достичь значений минерализации порядка 0,8-1,0 г/дм³. При условии дополнительного отведения стока р. Ялпуг, минуя озеро, возможно поддерживать минерализацию в водоеме порядка 0,6-0,7 г/дм³. Однако при отсутствии подкачки вод насосной станцией, отведение стока р. Ялпуг нецелесообразно, т.к. в условиях маловодного года он играет важную роль в поддержании уровней воды в водоеме выше 1 мБС.

Отдельные рекомендации к экологическому менеджменту Придунайских озер были разработаны на основе результатов численных экспериментов с точечной моделью эвтрофикации озер Ялпуг-Кугурлуй [10]. В частности, модельные расчеты для различных сценариев водопользования показали, что наиболее опасным для экосистемы водоема является его обмеление в маловодные годы, когда из-за низких уровней р. Дунай не удастся наполнить водоем до НПУ. Падение уровня воды в летний период года сопровождается уменьшением содержания биогенных веществ и ростом концентрации, как живого, так и косного органического вещества (рис. 10-11). Т.е. запасы биогенных веществ в водоеме трансформируются в запасы органического вещества. При этом опасность заключается в том, что это органическое вещество, вследствие гравитационного осаждения, депонируется в донных отложениях и на его биохимическое разложение расходуется содержащийся в воде кислород. При неблагоприятном стечении обстоятельств потребление кислорода на биохимическое разложение этого органического вещества может превысить его поступление за счет фотосинтеза и газообмена с атмосферой в течении достаточно длительного отрезка времени, что приведет к развитию гипоксии в придонных слоях воды. Такие условия могут сложиться, например, при отсутствии ветров в августе – сентябре, когда деструкция органического вещества фитопланктона превышает его продукцию, а в донных отложениях в течении лета накоплен большой запас косного органического вещества.

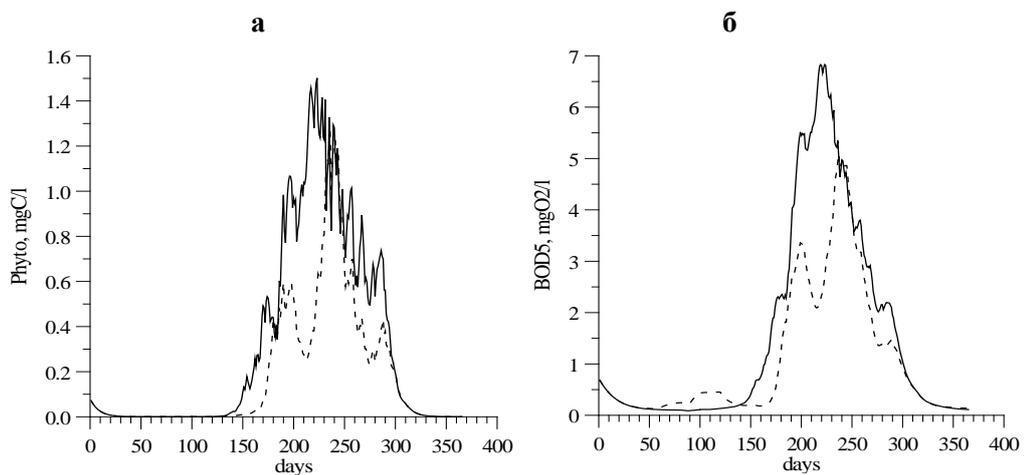
Концентрация органического вещества, образующегося в оз. Ялпуг-Кугурлуй в летний период года, зависит также от концентрации биогенных веществ в водах реки Дунай в весенние месяцы, когда имеет место их поступление в водоем в больших объемах. Численные эксперименты с моделью показали, что высокое содержание биогенных веществ в водах р. Дунай в период наполнения водоема влечет за собой более раннее цветение фитопланктона и усиление пика его биомассы в начале лета (рис. 12), когда биомасса зоопланктона еще не достигла тех значений, чтобы сдерживать рост фитопланктона.

Установлено, что на трофическом статусе водоема положительно сказывается забор воды на орошение полей либо сброс вод в р. Дунай в период цветения фитопланктона в августе – начале сентября, т.к. при этом

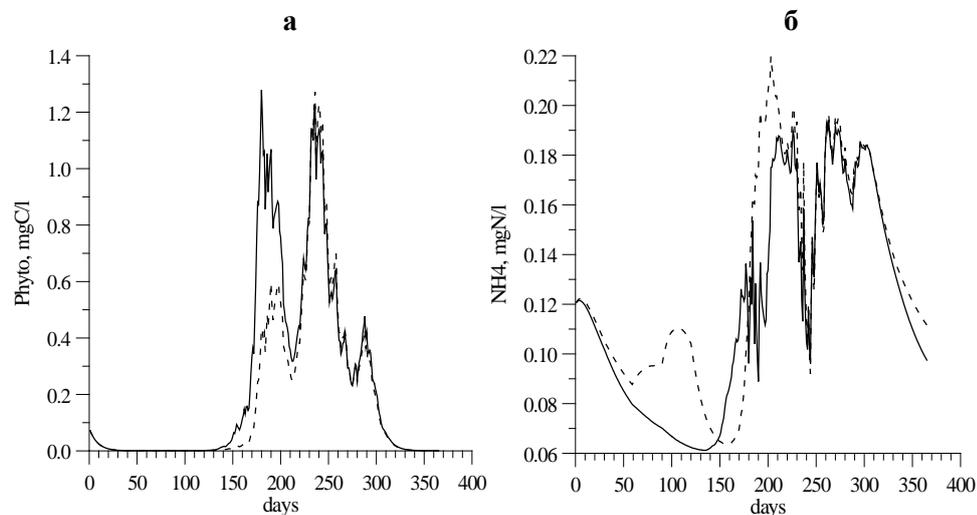
изымается из водоема образовавшееся органическое вещество. Тем самым уменьшается его количество, депонируемое в донных отложениях, и уменьшается риск возникновения гипоксии.



Р и с. 10. Рассчитанный по модели эвтрофикации оз.Ялпуг-Кугурлуй годовой ход величины БПК₅ (а) и содержания фосфатов (б) для условий маловодного (обеспеченность $p=75\%$), средневодного ($p=50\%$) и многоводного ($p=1\%$) года



Р и с. 11. Рассчитанный по модели годовой ход биомассы фитопланктона (а) и БПК₅ (б) для условий маловодного 1990 года (непрерывная кривая), при отсутствии наполнения озер водой из р.Дунай в весенний период, и средневодного 2001 года (пунктир)



Р и с. 12. Рассчитанные по модели эвтрофикации оз. Ялпуг-Кугурлуй кривые годового хода биомассы фитопланктона (а) и аммонийного азота (б) для средневодного года при задании наблюдаемого в 2001 году (пунктир) и повышенного (1985 г.) содержания аммонийного азота в водах р. Дунай в период их поступления в водоем (непрерывные кривые)

Следовательно, управление качеством вод оз. Ялпуг-Кугурлуй возможно путем регулирования поступления в водоем вод р. Дунай весной, в зависимости от концентрации в них биогенных веществ, и путем изъятия вод с повышенным содержанием органического вещества в августе – начале сентября.

Выводы. Для Придунайских озер и тех Причерноморских лиманов, связь которых с открытым морем затруднена, отмечаются сходные проблемы водохозяйственного использования: при отсутствии водообновления в летний период года в условиях маловодных лет водоемы обмелевают и качество их вод значительно ухудшается за счет повышения минерализации (солёности) и концентрации органического вещества.

Управление качеством вод Придунайских озер и указанной группы Причерноморских лиманов возможно путем регулирования водообмена с р. Дунай и прилегающей акваторией открытого моря, соответственно. Цель управления – уменьшение амплитуды сезонной и межгодовой изменчивости колебаний уровня воды в водоемах и, как следствие, стабилизация и улучшение их экологического состояния [1]. При регулировании водообмена водоемов с источниками их водообновления необходимо учитывать особенности сезонной изменчивости качества вод как в водоеме, так и в источниках (р. Дунай, море). Например, следует учитывать сезонную изменчивость влияния стока реки Дунай на качество морских вод в прилегающей к Тузловским лиманам акватории моря или закономерности изменчивости концентрации биогенных веществ в водах р. Дунай, в зависимости от ее расхода.

Балансовые или точечные математические модели могут эффективно использоваться для разработки рекомендаций по управлению гидрологическим и гидрохимическим режимами, экологическим состоянием эпизодически изолированных морских и внутриконтинентальных водоемов путем регулирования приходной и расходной частей их водного баланса. Эти модели более строгие, чем пространственно-разрешающие, поскольку потенциально содержат значительно меньше ошибок в численной и программной реализациях.

Численные пространственно-разрешающие модели гидродинамических и экологических процессов позволяют оптимизировать водообмен с источниками водообновления, т.к. с их помощью могут быть определены оптимальная численность, расположение, инженерные характеристики соединительных каналов, места водозабора, расположения насосных станций (для озер).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Краевые экосистемы. Лиманы северо-западного Причерноморья.* / Северо-западная часть Черного моря: биология и экология. – К.: Наукова думка.- ОФ ИНБЮМ.- 2006.- С. 351-427.
2. *Гопченко Е.Д., Кузниченко С.Д.* Научно-методические подходы по обеспечению оптимального режима функционирования Придунайских озер // Метеорологія, кліматологія та гідрологія.– 2005.– № 49. – С. 399-405.
3. *Гопченко Е.Д., Кузниченко С.Д.* Солевой режим озера Кугурлуй-Ялпуг в условиях искусственного зарегулирования // Вісник Одеського державного екологічного університету. – Київ: КНТ, ОДЕКУ.- 2005.- Вип.1. – С. 106 - 111.
4. *Гопченко Е. Д., Тучковенко Ю. С.* Сценарное моделирование водно-солевого режима Тузловских лиманов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 2003.–Вып.10.– С. 243 - 255.
5. *Гопченко Е.Д., Тучковенко Ю.С., Сербов Н.Г., Бузиян Г.Д.* Стабилизация гидрологического и гидрохимического режимов Тузловских лиманов путем регулирования водообмена с морем // Вісник Одеського державного екологічного університету. – Київ: КНТ, ОДЕКУ.- 2005.- Вип.1. – С. 187 - 194.
6. *Розробка заходів щодо відновлення і підтримання сприятливих гідрологічного і гідрохімічного режимів в районі Тузловської групи лиманів: Звіт про НДР/ Одес. Держ. Екол. Ун-т; № ДР 0103U006209.– Одеса, 2003.– 314 с.*
7. *Розенгурт М.Ш.* Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов одесских лиманов.- К.: Наукова думка, 1974.- 217 с.
8. *Виноградов К.А., Розенгурт М.Ш., Толмазин Д.М.* Атлас гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря.– К.: Наукова Думка, 1966.
9. *Тучковенко Ю.С.* Математическая модель формирования термохалинной структуры и циркуляции вод в лиманах, приустьевых и шельфовых областях северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 2003.– С. 138-153.
10. *Гопченко Е. Д., Тучковенко Ю. С.* Математическая модель эвтрофикации Придунайских озер // Гидробиологический журнал. – Киев: НАН Украины, Ин-т гидробиологии.– 2005.– Т. 41, № 1. – С. 92 - 105.