

Экспериментальные и экспедиционные исследования

УДК 551.465

В.Г. Симов, В.И. Морозов, И.Н. Фомина, Е.С. Мартынов

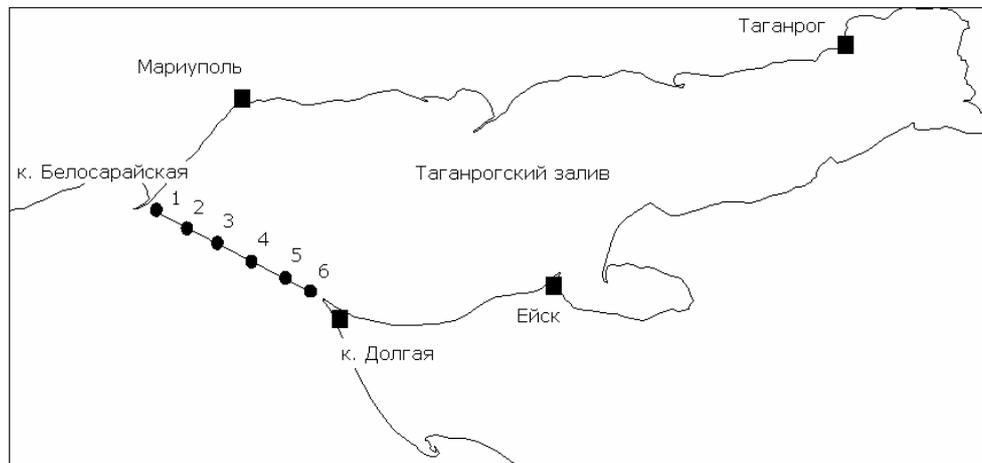
Водообмен Таганрогского залива с Азовским морем

На основе данных специализированных натурных наблюдений исследуются особенности водообмена Таганрогского залива с Азовским морем. Показано, что водообмен зависит в основном от интенсивности сгонно-нагонных ветров и, в меньшей мере, от стока р. Дон. Получены зависимости между расходами воды в проливе и скоростью изменения уровня в вершине залива. На их основе определены прямые и обратные потоки с малой дискретностью и уточнены их годовые величины.

Ключевые слова: Азовское море, Таганрогский залив, водообмен, расходы воды через пролив, прямой поток, обратный поток, годовые величины.

Введение

Таганрогский залив (рис. 1) – один из самых продуктивных районов Азовского моря. Являясь эстуарием устьевой области р. Дон с объемом воды, приблизительно равным годовому объему стока реки, воды залива отличаются низкой соленостью и высокой концентрацией биогенных веществ. С одной стороны, обменные процессы через Должанский пролив способствуют очищению вод Таганрогского залива за счет их выноса в море и разбавления морской водой. С другой стороны, приток морских вод повышает соленость вод залива, что уменьшает ареал обитания солоноватоводных пород рыб.



Р и с. 1. Схема станций наблюдения в Должанском проливе (●) и по периметру Таганрогского залива (■)

© В.Г. Симов, В.И. Морозов, И.Н. Фомина, Е.С. Мартынов, 2013

В работах [1, 2] обсуждалось отрицательное влияние уменьшения речного стока, связанного с антропогенным воздействием, на экосистему Таганрогского залива и рассматривался вариант сужения Должанского пролива с целью уменьшения осолонения залива. Однако при этом оказалось, что влияние водообмена на формирование абиотических параметров и биопродуктивность залива недостаточно изучено.

Первые работы по исследованию водообмена Таганрогского залива с Азовским морем появились при обосновании проекта Цимлянского гидроузла [3, 4]. Позже, в 70 – 90-е годы XX в., исследования водообмена через пролив активизировались в связи с усилением осолонения Азовского моря и необходимостью определения оценки его влияния на режим вод залива [5 – 7]. Из-за отсутствия достаточного количества натуральных наблюдений косвенными способами определялись только средние многолетние величины годового выноса вод в море и годовой приток вод в залив. По оценкам, приведенным в работе [3], они составили $126 \text{ км}^3/\text{год}$ из залива в море и $100 \text{ км}^3/\text{год}$ – из моря в залив; согласно [5 – 7], $48 – 56 \text{ км}^3/\text{год}$ – из залива и $28 – 36 \text{ км}^3/\text{год}$ – в залив. При этом результирующий водообмен во всех приведенных случаях был приблизительно равен годовому стоку р. Дон.

Значительные различия в оценках водообмена, отсутствие данных учащенных наблюдений большой продолжительности приводят к сложностям в получении детальных оценок влияния водообмена на экосистему залива, а также к трудностям при разработке практических рекомендаций по его оптимальному регулированию. В частности, затруднено решение задач, связанных с оценками интегрального переноса тепла и солей, загрязняющих и других веществ в неблагоприятных для экосистемы залива условиях: при аварийных сбросах, заморах рыб, в штормовых ситуациях, при проведении спасательных операций. Все указанные обстоятельства и определяют актуальность и практическую значимость настоящего исследования.

Цель данной работы – на основе результатов специализированных натуральных наблюдений в Должанском проливе (рис. 1), связывающем Таганрогский залив с Азовским морем, получить эмпирические зависимости для расчета водообмена через этот пролив; оценить с их помощью годовой водообмен для разных условий формирования речного стока; проанализировать особенности синоптической изменчивости расходов воды через пролив.

Используемые данные

В 70 – 90-е годы XX в. Севастопольским отделением Государственного океанографического института (в настоящее время Морское отделение Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института) была реализована программа специализированных натуральных исследований в Должанском проливе, результаты которых до настоящего времени детально не анализировались. Программа предусматривала синхронные измерения на разрезе коса Долгая – коса Белосарайская (рис. 1) вертушками ВММ скорости течений на 5 – 7 станциях и 4 – 5 горизонтах двумя-тремя судами, а также наблюдения за скоростью и направлением ветра. Одновременно проводились наблюдения за уровнем моря на гидрометеорологических станциях (ГМС) по

периметру Таганрогского залива. Всего для анализа было отобрано 180 съемок, время выполнения которых не превышало 3 ч при однозначном изменении уровня воды.

Скорость течения во время измерений определялась с точностью по модулю 0,01 м/с, по направлению – 5°. Это обеспечивало определение расхода воды при его средних значениях ~ 30 – 40 тыс. м³ с ошибкой не более ± 5%.

В результате интерполяции, учитывающей изменения уровня на момент измерений на станциях, для каждой съемки было получено распределение нормальной составляющей скорости течения $u_n(x_i, z_i)$ на разрезе с шагом $\Delta x = \sim 100$ м по горизонтали и $\Delta z = \sim 1$ м по вертикали. Здесь x_i, z_i – координаты центра элементарной ячейки, в которую интерполировались значения скорости. Прямой расход воды $Q_{пр}$ (из залива в море) определялся как сумма элементарных расходов $u_n(x_i, z_i)\Delta x\Delta z$ для всех $u_n(x_i, z_i) < 0$ по всему разрезу. Обратный расход воды $Q_{об}$ (из моря в залив) определялся как сумма элементарных расходов Q_i для всех $u_n(x_i, z_i) > 0$ по всему разрезу. Результирующий расход воды Q_p определялся как алгебраическая сумма $Q_{пр}$ и $Q_{об}$:

$$Q_p = Q_{пр} + Q_{об}. \quad (1)$$

Методика оценки составляющих водообмена

Расчеты $Q_{пр}$ и $Q_{об}$ показали, что для всех отобранных съемок «мгновенный» расход воды через пролив за период май – ноябрь не превышал 50,4 тыс. м³/с при прямом потоке и 74,3 тыс. м³/с – при обратном. В большинстве случаев максимум $Q_{пр}$ наблюдался в первой половине суток, максимум $Q_{об}$ – во второй.

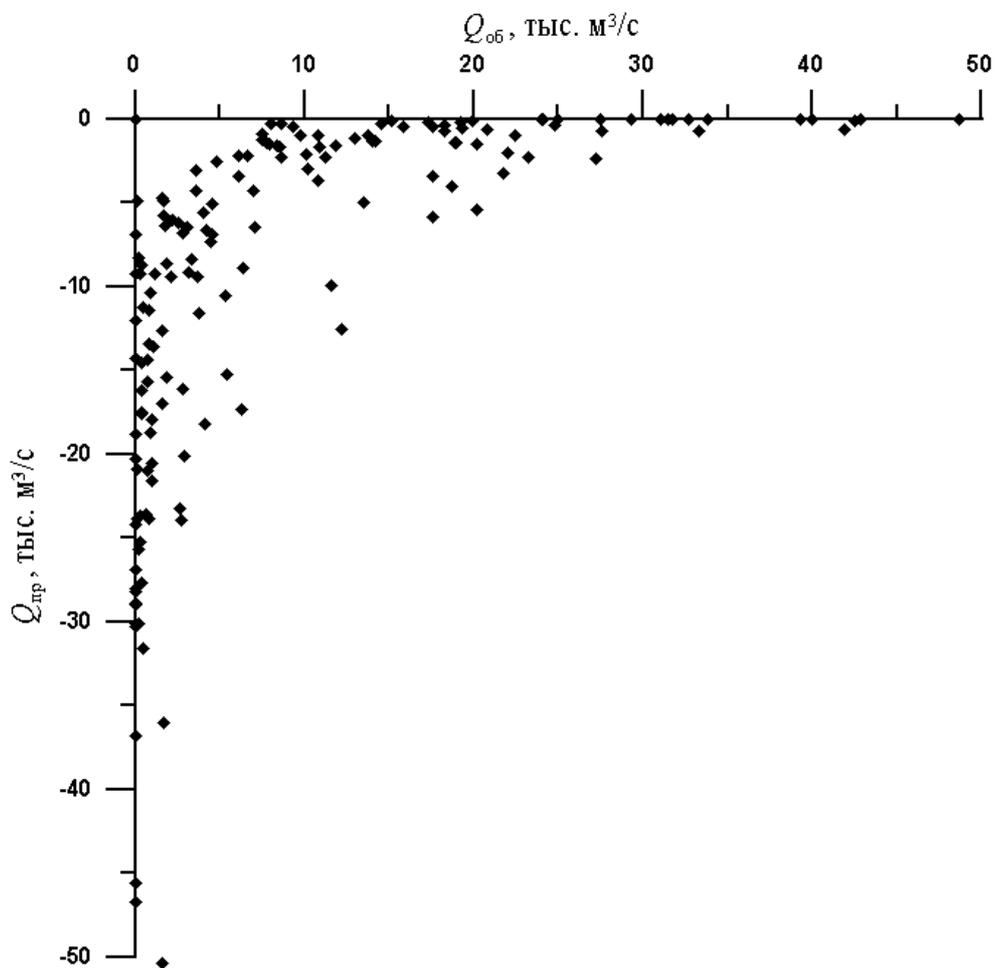
Было также установлено, что между $Q_{пр}$ и $Q_{об}$ в интервале значений – 20 тыс. ... +20 тыс. м³/с имеет место обратно пропорциональная зависимость, показанная на рис. 2. При этом за пределами указанных значений наблюдаются только однонаправленные потоки. В свою очередь для разнонаправленных потоков, формирующихся при малых скоростях ветра (до 6 м/с), получена следующая зависимость $Q_{пр}$ от Q_p (рис. 3):

$$Q_{пр} = -2 \cdot 10^{-5} Q_p^2 + 0,5 Q_p - 4190, \quad (2)$$

для которой коэффициент корреляции r равен 0,92, коэффициент детерминированности R^2 равен 0,98. Высокие значения r и R^2 позволяют использовать зависимость (2) для оценки $Q_{пр}$, а затем определить $Q_{об}$ из формулы (1). Так как мы имеем две зависимости для трех неизвестных, необходимо получить еще одну зависимость для определения Q_p .

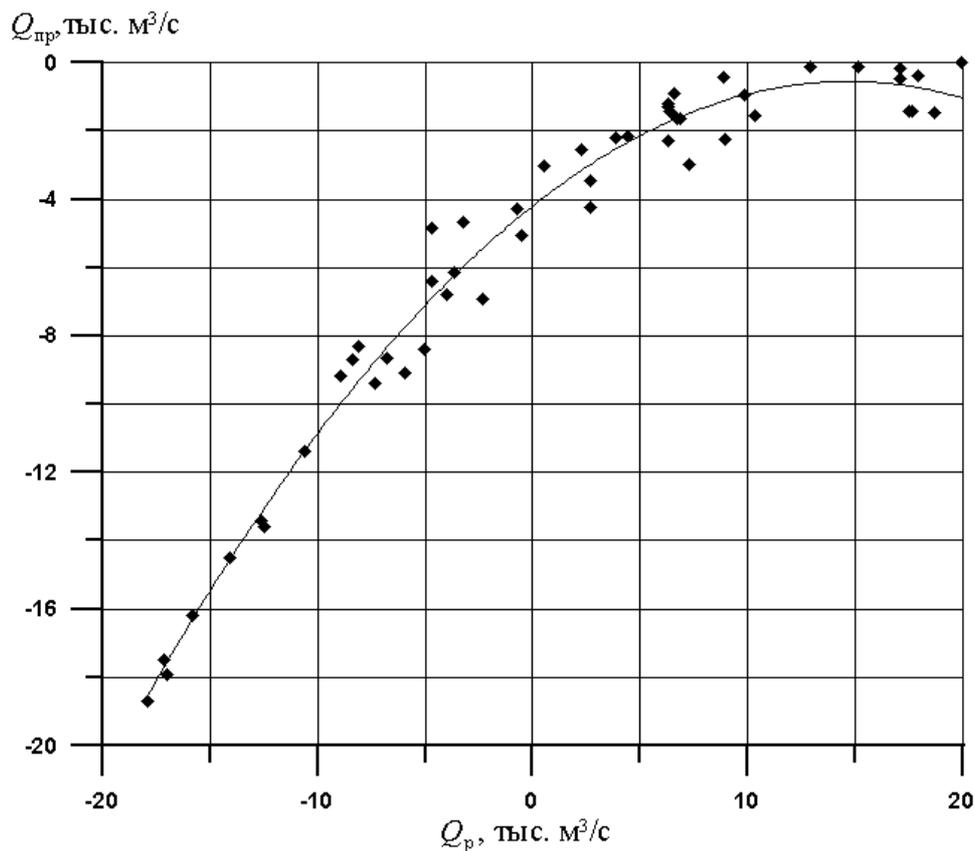
Поскольку Таганрогский залив достаточно мелководен, можно попытаться найти связь Q_p с изменениями уровня моря в его вершине. Анализ син-

хронных графиков колебаний уровня на ГМС «Таганрог», измеренных расходов воды в проливе, проекции скорости ветра на продольную ось залива по наблюдениям на ГМС «Ейск» показал наличие согласованности между этими параметрами. Было установлено, что действующие вдоль оси пролива ветры со скоростью 6 м/с и более вызывают стонно-нагонные колебания уровня воды, которые четко регистрируются самописцем уровня на ГМС «Таганрог».



Р и с. 2. Взаимосвязь расходов воды прямого ($Q_{пр}$) и обратного ($Q_{об}$) потоков через Должанский пролив

При расчетах Q_p также необходимо учитывать изменения результирующей пресного баланса, которая, согласно [6], может быть приближенно принята равной стоку р. Дон (Q_d). Как показано в [8], скорость стоковых течений в акватории залива равна ~ 1 см/с. Однако поступающий в залив речной сток является постоянно действующим фактором, поэтому его вклад в водообмен через пролив следует учитывать.



Р и с. 3. Зависимость прямого ($Q_{пр}$) расхода воды от результирующего ($Q_{р}$)

С учетом вышесказанного была рассмотрена зависимость результирующего расхода воды в проливе вида

$$Q_{р} = aI - Q_{д} + b, \quad (3)$$

здесь $I = \Delta H / \Delta t$ – скорость изменения уровня воды на ГМС «Таганрог», ΔH – приращение уровня за время Δt ; a, b – эмпирические коэффициенты.

Было получено два набора коэффициентов (при r и R^2 больше 0,9):

$$a = 5100 \text{ м}^2, \quad b = 46 \text{ м}^3/\text{с} \quad \text{при } V_E \leq 5 \text{ м/с}, \quad (4)$$

$$a = 8400 \text{ м}^2, \quad b = 595 \text{ м}^3/\text{с} \quad \text{при } V_E > 5 \text{ м/с}, \quad (5)$$

где V_E – проекция скорости ветра на ось Таганрогского залива, полученная по данным измерений на ГМС «Ейск».

Результаты расчетов

На основе анализа многолетних данных о стоке р. Дон и ветровой активности на прибрежных станциях Азовского моря было выбрано три года с раз-

ными условиями формирования водообмена: маловодный (1972 г.), многоводный (1979 г.) и год, когда сток приблизительно был равен среднему многолетнему значению (1980 г.).

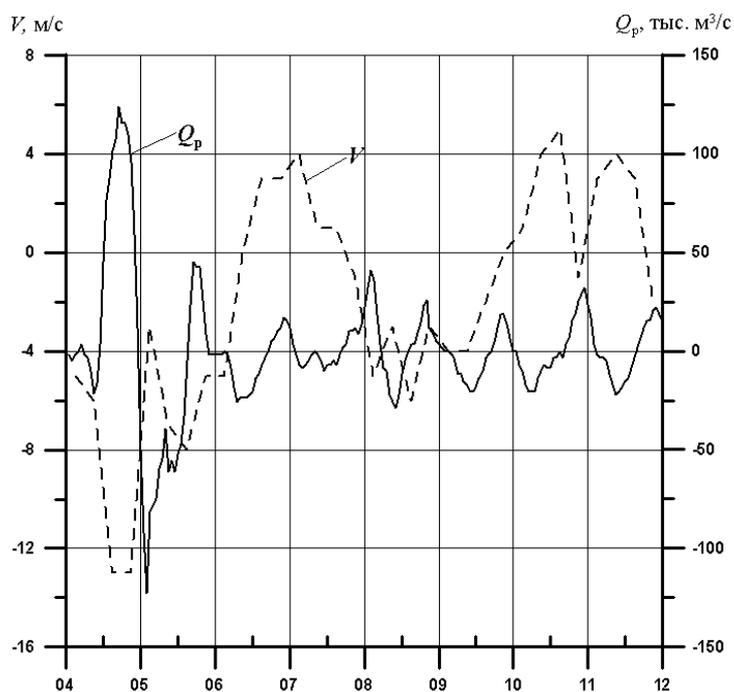
Для расчетов ежечасных результирующих, прямых и обратных расходов воды использовался набор формул (1) – (5). Для ледового периода, когда изменения самописцем уровня не производились, использовались четырехсрочные наблюдения, по которым определялись среднесуточные расходы воды. Сравнимость среднесуточных данных, полученных по ежечасным и четырехсрочным наблюдениям, обеспечивалась введением переходных коэффициентов. Эти коэффициенты для каждого года определялись по зависимости между Q_p , вычисленными из ежечасных значений и по четырехсрочным наблюдениям.

В таблице представлены суммарные значения составляющих водообмена через Должанский пролив и суммарный сток р. Дон за характерные годы. Как видно, годовые объемы выноса вод из залива в море изменяются от 177 до 212 км³, а из моря в залив – от 169 до 176 км³. При объеме Таганрогского залива 24,6 км³ это соответствует 5 – 6-кратному обновлению его водных масс. Приведенные данные уточняют результаты работ [3 – 6], полученные косвенным путем. Как и в указанных публикациях, результирующий перенос за 1972 г. (маловодный) и 1979 г. (многоводный) близок к величине годового стока р. Дон. В 1980 году, который отличается средними показателями основных факторов водообмена, результирующий перенос вод из залива в море почти вдвое меньше стока р. Дон, что свидетельствует о большой активности нагонных явлений.

Составляющие водообмена через Должанский пролив и сток р. Дон (км³) за характерные годы

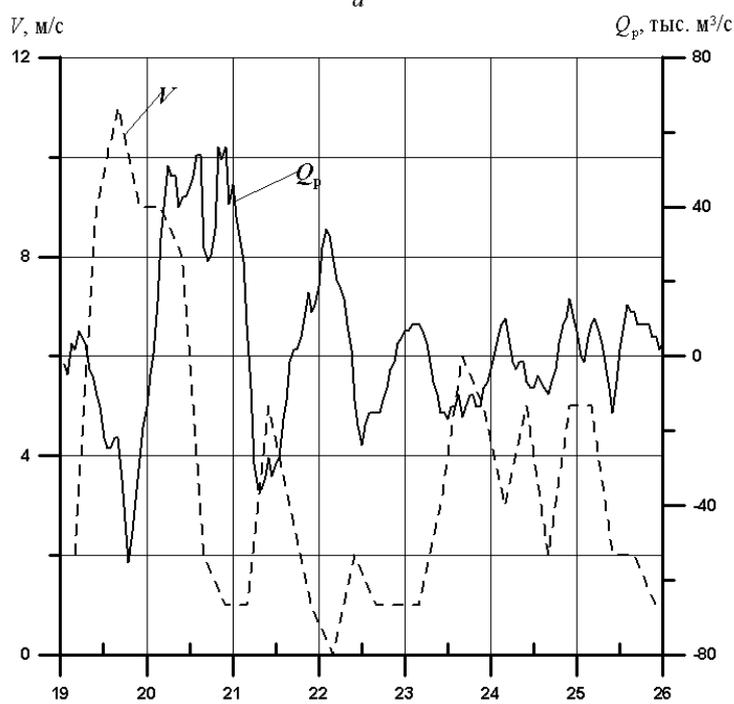
Составляющие, сток р. Дон	1972 г.	1979 г.	1980 г.
Из залива	177	212	188
В залив	169	176	176
Результирующий	8,0	36,0	12,0
Сток р. Дон	7,96	38,5	21,3

Рассмотрим примеры применения разработанной методики для воспроизведения синоптической изменчивости суммарных расходов Q_p . На рис. 4 для двух типичных ситуаций показаны полученные с помощью формулы (3) изменения Q_p в проливе, а также изменения проекции скорости ветра на ось залива V_E . Как видно, нагонный ветер (рис. 4, а), скорость которого с 9:00 до 15:00 4 апреля 1972 г. возросла от 5 до 13 м/с, сформировал нагон, при котором Q_p достиг максимального значения в 15:00. Последующее ослабление ветра до 5 м/с с 6 по 11 апреля привело к возникновению в заливе колебаний с периодом, близким к суточному, что соответствует первой моде сейшевых колебаний в Азовском море [9]. Подобный эффект возникновения суточных колебаний Q_p , но для сгонного ветра, имел место 19 – 26 ноября 1979 г. (рис. 4, б), когда вначале скорость сгонного ветра усиливалась от 2 до 11 м/с, а затем в течение 7 сут не превышала 5 м/с.



Апрель 1972 г.

а



Ноябрь 1979 г.

б

Р и с. 4. Типичное изменение скорости ветра (V) и результирующего расхода воды (Q_p) при нагоне (а) и сгоне (б)

Анализ результатов расчетов показывает, что сильные потоки в проливе с Q_p , в 5 – 10 раз превышающими Q_p при сейшеобразных колебаниях, обычно продолжаются от нескольких часов до 2 – 3 сут. Большую же часть года преобладают сейшеобразные колебания Q_p , значения которых изменяются в пределах $\pm 20 - 30$ тыс. м³/с.

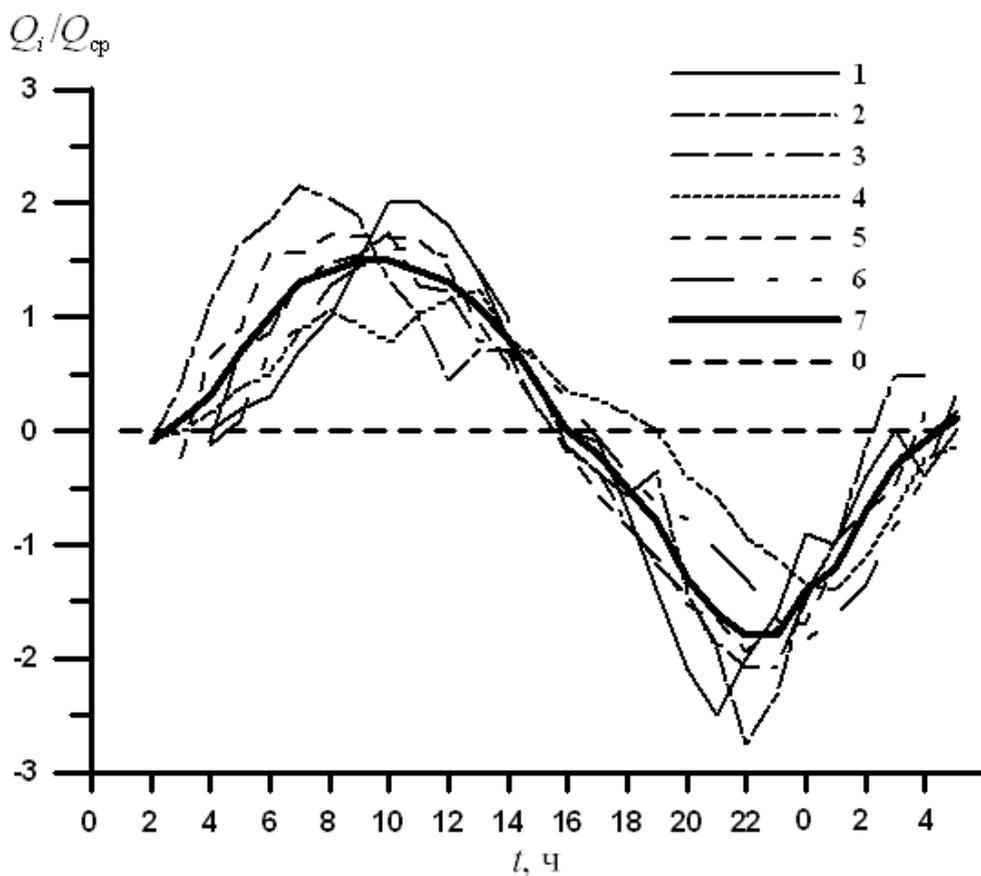


Рис. 5. Суточные изменения во времени (t) нормированных значений ежеhourных расходов воды (Q_i/Q_{cp}) в Должанском проливе в маловетренную погоду: кривые 1, 2 – апрель 1972 и 1979 гг.; кривая 3 – август 1972 г.; кривая 4 – июнь 1979 г.; кривая 5 – август 1980 г.; кривая 6 – сентябрь 1972 г.; кривая 7 – осредненная за все периоды

Рис. 5 иллюстрирует проявления суточного хода ежеhourных результирующих расходов воды в Должанском проливе для теплого периода года и маловетренных ситуаций. Для каждой ситуации в указанные месяцы значения ежеhourных расходов воды (Q_i) нормированы на их среднее значение (Q_{cp}) за время существования однонаправленного потока, затем коэффициенты Q_i/Q_{cp} осреднены для всех случаев данного месяца. Как видно по кривым за отдельные месяцы и по осредненной для всех месяцев кривой, прямой рас-

ход, когда преобладают потоки из залива ($Q_i / Q_{cp} > 0$), наблюдается в утренние часы (~ 9:00), а в вечерние часы (~ 21:00) преобладают потоки в залив ($Q_i / Q_{cp} < 0$). Вероятнее всего, наличие такого суточного хода Q_p связано с возникновением бризовой циркуляции в теплый период года. Однако этот вопрос требует отдельного изучения, основанного на детальной информации о суточном ходе характеристик атмосферы над морем и прибрежной сушей.

Выводы

Анализ результатов специализированных натурных наблюдений в Должанском проливе показал, что водообмен Таганрогского залива с Азовским морем представляет собой сложный процесс, складывающийся из вынужденных сгонно-нагонных и свободных сейшеобразных колебаний расходов воды. Найденные эмпирические зависимости позволили изучить механизм водообмена, определить периодичность сейшеобразных колебаний расходов воды, а также уточнить количественные оценки составляющих водообмена. Как показали расчеты, водообмен через пролив происходит более интенсивно, чем это предполагалось ранее, он обеспечивает многократное обновление водных масс в заливе.

Полученные эмпирические зависимости позволяют рассчитать расходы воды через пролив при наличии относительно легко получаемых ежечасных данных об уровнях воды на ГМС «Таганрог», а по сведениям о содержании различных веществ – их интегральный перенос в прилегающие водоемы.

Исследования водообмена Таганрогского залива с Азовским морем требуют дальнейшего продолжения. На следующем этапе предполагается провести сопоставление предложенной в работе методики оценки водообмена с оценками, полученными с помощью численной модели циркуляции вод Азовского моря [10, 11]. Также предполагается изучить особенности водообмена при наличии ледяного покрова, дальность распространения в прилегающие районы переносимых водных масс, отличающихся специфическими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Симов В.Г.* Гидрология устьев рек Азовского моря. – М.: Московское отделение Гидрометеоздата, 1989. – 327 с.
2. *Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 1. Азовское море / Ю.П. Ильин, В.В. Фомин, Н.Н. Дьяков, С.Б. Горбач.* – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – 402 с.
3. *Самойленко В.С.* Ближайшее будущее Азовского моря // Тр. ГОИН. – 1947. – Вып. 3(15). – С. 43 – 99.
4. *Федосов М.В.* Интенсивность осолонения вод Азовского моря в связи с малым стоком Дона и Кубани в 1949 – 1950 гг. // Там же. – 1953. – Вып. 16. – С. 78 – 83.
5. *Шлыгин И.А.* Соленость Таганрогского залива при изменении его водообмена с Азовским морем // Метеорология и гидрология. – 1978. – № 4. – С. 67 – 72.

6. *Симов В.Г., Палеева С.В.* Водообмен Таганрогского залива с Азовским морем и его влияние на изменение солёности вод залива // Водохозяйственные мероприятия и их влияние на устья рек Азово-Черноморского бассейна. – Севастополь, 1979. – 13 с. – Деп. в ВИНТИ – МЦД, № 100, ГМ – Д81.
7. *Бронфман А.М., Хлебников Е.П.* Азовское море. Основы реконструкции. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 270 с.
8. *Скриптунов Н.А.* Течения на устьевом взморье Дона (Таганрогский залив) // Тр. ГОИН. – 1978. – Вып. 139. – С. 43 – 57.
9. *Еремеев В.Н., Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* Моделирование длинных волн в Азовском море, вызываемых прохождением циклонов // Океанология. – 2000. – 40, № 5. – С. 658 – 665.
10. *Иванов В.А., Фомин В.В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море – суша. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – 363 с.
11. *Фомин В.В., Иванов В.А., Фомина И.Н.* Численная бароклинная модель циркуляции вод Азовского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – С. 281 – 293.

Морское отделение Украинского научно-исследовательского
гидрометеорологического института,
Севастополь
E-mail: mb_uhmi@stel.sebastopol.ua

Материал поступил
в редакцию 07.12.11
После доработки 15.03.12

АНОТАЦІЯ На основі даних спеціалізованих натурних спостережень досліджуються особливості водообміну Таганрозької затоки з Азовським морем. Показано, що водообмін залежить в основному від інтенсивності згонно-нагонних вітрів та, в меншій мірі, від стоку р. Дон. Отримано залежності між витратами води в протоці та швидкістю зміни рівня у вершині затоки. На їх основі визначені прямі та зворотні потоки з малою дискретністю та уточнено їх річні величини.

Ключові слова: Азовське море, Таганрозька затока, водообмін, витрати води через протоку, прямий потік, зворотний потік, річні величини.

ABSTRACT Features of water exchange between the Taganrog Bay and the Sea of Azov are studied based on specialized field observations. It is shown that water exchange mostly depends on the surge winds' intensity and, to a lesser extent, on the river Don runoff. Relations between the water discharge in the strait and the speed of water level change on the top of the bay are obtained. They constitute a basis for defining direct and reverse fluxes with small discreteness and for specifying their annual values.

Keywords: Sea of Azov, Taganrog Bay, water exchange, water flow through the strait, direct flow, reverse flow, annual values.