

УДК 556.54

ВОДО-, СОЛЕ- И ТЕПЛООБМЕН ЧЕРЕЗ КИНБУРНСКИЙ ПРОЛИВ ДНЕПРОВСКО-БУГСКОГО ЛИМАНА

© 2014 г. Р. Я. Миньковская¹, А. Н. Демидов²

¹Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь
e-mail: rosamariya@mail.ru

²Морское отделение Украинского научно-исследовательского
гидрометеорологического института, Севастополь
e-mail: sev-oasis@mail.ru

Поступила в редакцию 07.02.2013 г.

На основе многолетних наблюдений (с 1965 по 2011 гг.) изучена суточная, сезонная и годовая изменчивость расходов воды, солей и тепла в Кинбурнском проливе Днепровско-Бугского лимана. Предложен метод расчета и уточнены значения водо-, соле- и теплообмена через пролив для решения практических задач, связанных с рациональным использованием водных ресурсов этого устьевых региона.

DOI: 10.7868/S0030157414050116

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования экологического состояния Черного моря имеют важное научное и практическое значение. Существенное влияние на состояние среды оказывает вынос рек бассейна Черного моря (336 км³), интегрирующих загрязняющие вещества с площади 1.9 млн. км², в 50 раз превышающей площадь моря (422 тыс. км²). Второй (после р. Дунай) по размерам рекой бассейна моря является р. Днепр, которая протекает по территории России, Белоруссии и Украины и вместе с р. Южный Буг выносит в среднем за год в море: 45.3 км³ воды, 1 млн. т наносов, 1850×10^{15} Дж тепла, 16.5 млн. т минеральных, 186 тыс. т биогенных и 14.8 тыс. т загрязняющих веществ. Реки Днепр и Южный Буг впадают в Днепровско-Бугский лиман и образуют общее морское устье, со сложным устьевым взморьем, состоящим из двух взаимосвязанных частей: Днепровско-Бугского лимана и прилегающей северо-западной части Черного моря, на которую распространяется влияние стока рек. Обмен водой, веществами и энергией между этими частями осуществляется через Кинбурнский пролив, расположенный между косами Кинбурнской и Очаковской (рис. 1), поэтому его оценка является важной практической и теоретической задачей, от правильного решения которой зависит достоверность балансовых оценок как морских устьев рек, так и Черного моря. Аналогичные проливы, через которые происходит обмен с морем, имеют устья рек Днестр (Цареградское гирло), Дон (Должанский пролив), Черная и др., поэтому представленная разработка может быть применима для расчета обмена между устье-

выми взморьями и прилегающими частями моря в других устьевых регионах [9].

Обменные процессы в Кинбурнском проливе, обуславливающие изменчивость гидрологических и гидрохимических характеристик устья, изучены недостаточно, поэтому расчет составляющих баланса воды, солей, тепла и веществ является проблематичным. Затрудняет решение сложность гидрологического режима в Кинбурнском проливе (разнонаправленность потоков), трудоемкость получения синхронных измерений скорости течения, солёности, температуры и химического состава воды в его поперечном сечении, особенно в экстремальных погодных условиях, отсутствие надежных расчетных методов, позволяющих точно оценить водо-, соле- и теплообмен через пролив при различных, постоянно изменяющихся гидрометеорологических условиях (рис. 1).

Предшествующие исследования, посвященные обмену через Кинбурнский пролив, были ориентированы на оценку прямого (из лимана в море) и обратного (из моря в лиман) переноса воды и солей. Определение составляющих водообмена выполнено Копайгородским [5] и Журавлевой [3] на основе решения уравнений водного и солевого балансов. Слатинский [14, 15], Розенгурт и Толмазин [12] для определения прямого и обратного потоков использовали данные эпизодических наблюдений за течениями в Кинбурнском проливе (с 1920 по 1970 гг.). При этом поток считался однонаправленным в течении 8 часов, скорость однонаправленного течения принималась как средняя арифметическая в сечении потока, водообмен рассчитывался по числу случаев с течениями прямого или обратного направления,

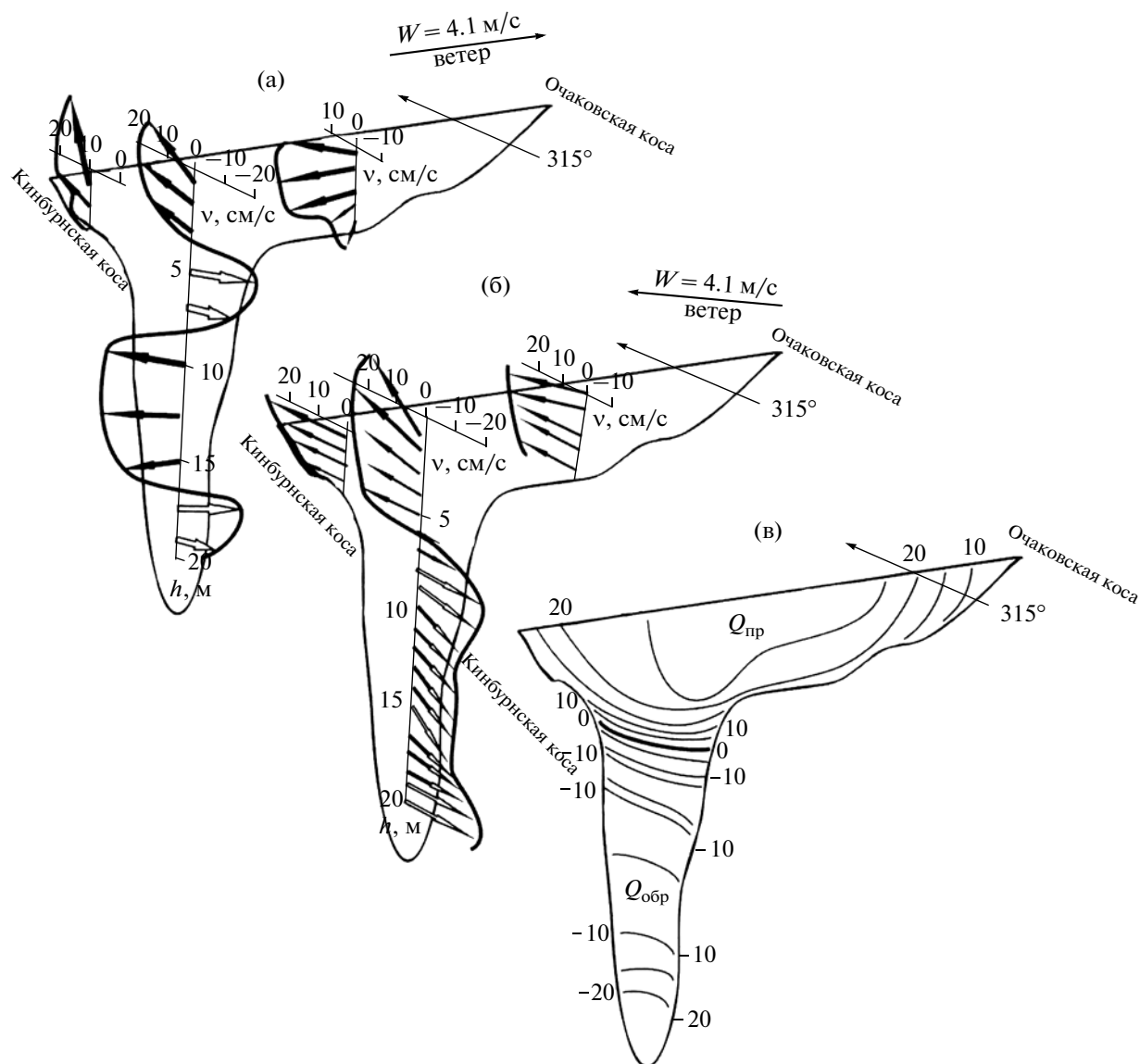


Рис. 1. Многослойные течения в Кинбурнском проливе 14.10.2006 г. (а), преобладающие течения (б) и средние за период с 1976 по 2011 гг. изотахи (в).

W – скорость ветра; v – скорость течения; 315° – направление по нормали к сечению пролива; $Q_{\text{пр}}$ – площадь сечения пролива, занятая прямым потоком (изотахи положительные); $Q_{\text{обр}}$ – площадь сечения пролива, занятая обратным потоком (изотахи отрицательные).

с учетом ветровой составляющей водообмена [11]. В реальности, как показано в работах [4, 7, 8], в проливе преобладают разнонаправленные потоки, а смена преобладающего направления переноса обычно происходит дважды в сутки. По данным работы [10], течения в проливе и водообмен изменяют свое направление 3–5 раз в сутки, а в соответствии с работой [16] – 4 раза в сутки.

Для расчета годовых значений водообмена через пролив Костяницын [6] в уравнения баланса воды и солей предложил вводить величины изменения объема лимана и его средней солености от года к году. При этом пресная составляющая ба-

ланса, средняя соленость морской и лиманной воды, а также изменение солености лимана от года к году определялись по эмпирическим зависимостям. Несмотря на усложнение расчетов, Костяницыным [6] получены результаты, близкие к результатам Слатинского [15].

Для расчета водообмена Большаков использовал соотношения Праудмэна [1], а Тимченко учитывал приливо-отливную и сгонно-нагонную составляющие уровня, по которым определялось расчетное положение уровня моря в районе пролива и в зависимости от него – расход воды через пролив [16].

Таблица 1. Годовой водообмен (км³) через Кинбурнский пролив

Авторы	Источник	Период	Прямой поток	Обратный поток
Копайгородский Е.М.	[5]	1892–1927	69.4	14.5
Слатинский Ю.Г.	[14]	1920–1960	97.4	46.5
Слатинский Ю.Г.	[15]	1956–1970	98.0	43.0
Костяницын М.Н.	[6]	1945–1960	102.4	43.8
Розенгурт М.Ш.	[11]	1958–1970	72.0	22.0
Большакова В.С.	[1]	1948–1960	79.0	26.0
Журавлева Л.А.	[3]	1955–1980	54.3	10.1
Тимченко В.М.	[16]	1956–1986	86.3	40.7

Результаты, полученные разными авторами, существенно (в 1.5–3 раза) расходятся между собой (табл. 1), что, очевидно, обусловлено недостаточной точностью определения солёности прямого и обратного потоков (при использовании совместного решения уравнений водного и солевого балансов) и недостаточностью данных о режиме течений в Кинбурнском проливе (при непосредственном расчете водообмена по расходам воды или повторяемости течений в проливе).

Накопленные данные многолетних наблюдений в Кинбурнском проливе за течениями, температурой и солёностью воды позволили получить новые значения составляющих водо-, соли и теплообмена через Кинбурнский пролив Днепровско-Бугского лимана.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ

В настоящей работе для исследования обменных процессов использовались данные специальных наблюдений, полученные Николаевским центром по гидрометеорологии, Морской гидрометеорологической станцией Очаков и Лабораторией устьев рек Севастопольского отделения Государственного океанографического института [8]. Измерения расходов в Кинбурнском проливе выполнялись, начиная с 1965 г., а в начале 90-х годов прошлого века они были активизированы под руководством Симова [10, 13]. Тогда же материалы были систематизированы: расходы воды, солей и тепла рассчитывались вручную, аналитическим и графическим методами, с помощью планирования.

На основе многолетних наблюдений (с 1965 по 2011 гг.) подразделений Гидрометеослужбы Украины в Кинбурнском проливе (рис. 1) с помощью программ, разработанных Демидовым [8, 9], рассчитано 818 измеренных расходов воды и по 666 расходов солей и тепла через пролив. Для вычисления расходов поперечное сечение пролива (рис. 1) разбивалось по ширине (около 4 км) вертикалями через 45 м (93 вертикали) и горизонталями с шагом 1 м (от 0 на урезах до 22 горизонтов

на глубоководной станции 11г). Измерения направления и скорости течений, температуры и солёности выполнялись на 6 вертикалях, на стандартных горизонтах (поверхность, 3, 5, 10, 15, 20 м и у дна). Направления течения проектировались на ось 315° – 135° (по нормали к сечению пролива). Течения, направленные из лимана в море, имели знак плюс, обратные течения – минус. Эпюры скорости, температуры и солёности строились с помощью сплайн-интерполяции, значения снимались через 1 м. Интерполяция между вертикалями, на которых производились измерения параметров, выполнялась в узлы сетки, а в краевых точках – с учетом значений в трех ближайших узлах. Вычислялись элементарные расходы воды (как произведение скорости течения на площадь ячейки), а также солей и тепла (как произведение скорости течения на солёность или температуру воды соответственно, и площадь ячейки). Расходы прямого (с плюсом, $Q_{пр}$) и обратного (с минусом, $Q_{обр}$) направлений получались путем суммирования элементарных расходов воды, солей и тепла в пределах соответствующих частей площади поперечного сечения пролива, разграниченных нулевой изотаксой (рис. 1в). Результирующий перенос ($Q_{рез}$) определялся как алгебраическая сумма прямого и обратного потоков.

Для исследования короткопериодной изменчивости обменных процессов получены статистические зависимости расхода воды прямого и обратного потоков через Кинбурнский пролив от интенсивности изменения уровня воды в вершине лимана (с. Касперовка) за период с 1975 по 2011 гг. (выбор расчетного периода обусловлен наличием ежечасных наблюдений уровня воды на водомерном посту в с. Касперовка только с 1975 г.). Они представлены на рис. 2 и выражаются уравнениями (1), (2), корреляционные отношения которых составляют 0.95 и 0.96 соответственно:

$$Q_{пр} = -9.3J^3 + 147J^2 - 736J + 1246, \quad (1)$$

$$Q_{обр} = 5.1J^3 + 120J^2 + 531J + 727. \quad (2)$$

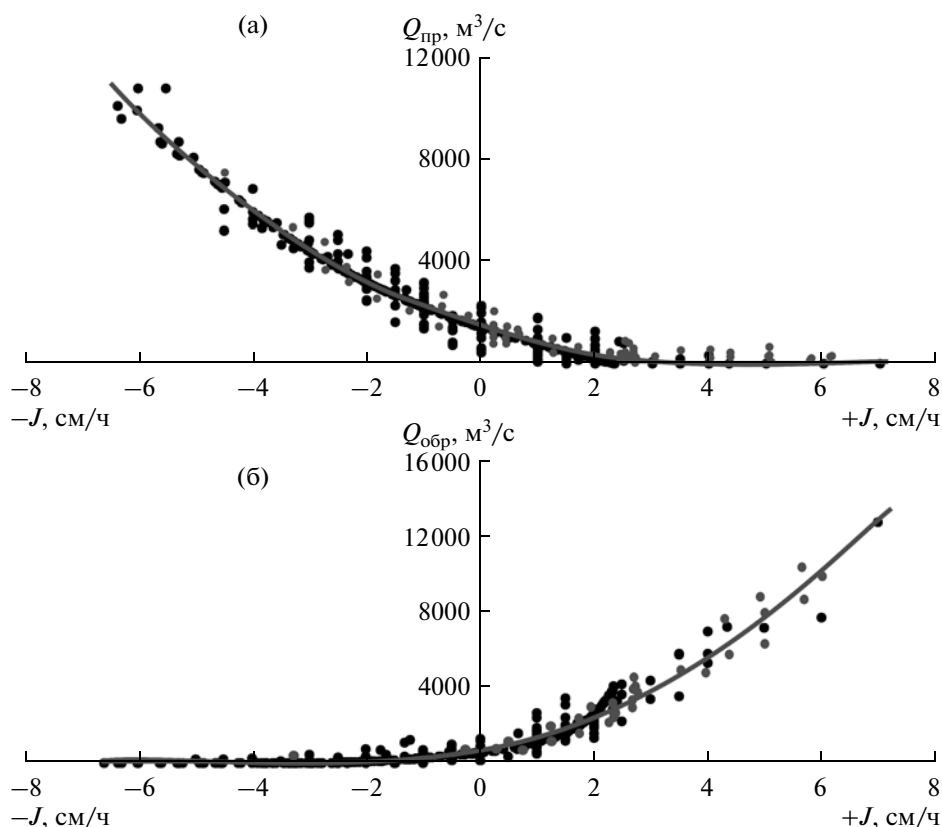


Рис. 2. Зависимость прямого (а) и обратного (б) расходов воды через Кинбурнский пролив ($Q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{обр}}$, $\text{м}^3/\text{с}$) от средней за период измерения интенсивности изменения уровня воды в с. Касперовка ($\pm J$, $\text{см}/\text{ч}$) по данным наблюдений с 1975 по 2011 гг.

Здесь $Q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{обр}}$ — измеренные в Кинбурнском проливе расходы воды прямого и обратного направлений, $\text{м}^3/\text{с}$; $\pm J$ — средняя интенсивность изменения уровня воды (знак плюс соответствует подъему уровня, минус — спаду) на водомерном посту в с. Касперовка, $\text{см}/\text{ч}$.

Из рис. 2 следует, что рост уровня воды у нижней границы дельты р. Днепр ($+J$) соответствует уменьшению прямого и увеличению обратного потока через пролив, а падение уровня — увеличению прямого и уменьшению обратного потока. Следовательно, расходы воды в проливе соответствуют скорости притока в лиман или оттока из него (что и характеризуется интенсивностью изменения уровня воды в с. Касперовка) в большей степени, чем расходам воды р. Днепр (в этом случае росту уровня у нижней границы дельты соответствовало бы увеличение прямого потока через пролив). Расход воды р. Днепр является фоном для более значимых краткосрочных изменений уровня воды и течений [8]. Это обстоятельство позволило в расчетах краткосрочных изменений составляющих обмена через пролив считать сток р. Днепр квазипостоянной величиной. Однако разброс точек (рис. 2) может быть обусловлен не только погрешностями измерений и расчета рас-

хода воды через пролив, но и “стоковым” фоном, на котором развиваются обменные процессы.

Полученные зависимости использованы для анализа изменчивости переноса воды, тепла и солей через пролив при отсутствии наблюдений, а также для разработки расчетных методов, позволяющих по стационарным наблюдениям на водомерных постах Гидрометеослужбы Украины давать приближенную оценку составляющих обменных процессов с дискретностью от 1 часа и более [8, 9]. Эти зависимости характеризуют соответствие расхода воды (рис. 2) и тепла [9] прямого или обратного потоков через Кинбурнский пролив и интенсивности изменения уровня воды в вершине лимана (с. Касперовка), а также значений исследуемых элементов переноса в Кинбурнском проливе. Например, для расхода тепла применялись зависимости, приведенные в [9]:

$$\Theta_{\text{пр}}, \Theta_{\text{обр}} = f(\pm J, t_{\text{пр}}, t_{\text{обр}}), \quad (3)$$

$$t_{\text{пр}}, t_{\text{обр}} = f(t_{\text{оч}}). \quad (4)$$

Здесь $\Theta_{\text{пр}}$, $\Theta_{\text{обр}}$ — средние за время измерения расходы тепла через Кинбурнский пролив прямого и обратного потоков, 10^{10} Вт; $\pm J$ — средняя интенсивность изменения уровня воды в с. Каспе-

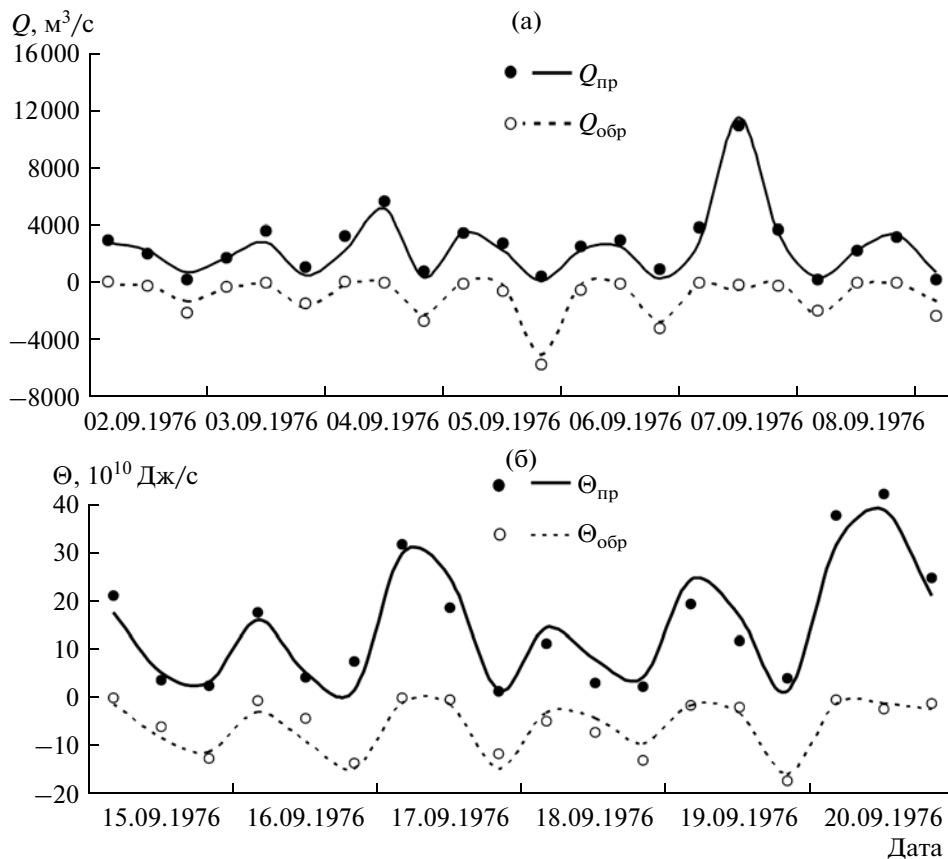


Рис. 3. Фрагмент ежечасной изменчивости расходов воды (а) и тепла (б) в Кинбурнском проливе прямого ($Q_{\text{пр}}$, $\Theta_{\text{пр}}$) и обратного ($Q_{\text{обр}}$, $\Theta_{\text{обр}}$) направлений в сентябре 1976 г.

ровка, см/ч; $t_{\text{пр}}$, $t_{\text{обр}}$ — температура воды соответствующего потока, рассчитанная по температуре воды в г. Очакове ($t_{\text{Оч}}$), интерполированной на середины интервалов измерений в проливе, °С. При этом расчет выполнялся отдельно для периода нагрева, охлаждения и экстремальных значений [8].

Удовлетворительное совпадение измеренных и рассчитанных по уравнениям (1)–(4) значений расходов воды и тепла иллюстрирует фрагмент, представленный на рис. 3.

Для расчета средних годовых и средних многолетних значений водообмена через Кинбурнский пролив использовалась методика, рекомендованная в [2] и апробированная Альтманом для расчета обмена через пролив Босфор. В основу расчета положены зависимости между прямыми (а также обратными) расходами воды ($Q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{обр}}$) и их результирующим значением переноса ($Q_{\text{рез}}$). Аналитическое выражение полученных зависимостей имеет вид

$$Q_{\text{пр}} = 2 \times 10^{-21} Q_{\text{рез}}^6 + 4 \times 10^{-18} Q_{\text{рез}}^5 - 6 \times 10^{-13} \times Q_{\text{рез}}^4 - 5 \times 10^{-10} Q_{\text{рез}}^3 + 8 \times 10^{-5} Q_{\text{рез}}^2 + 0.5 Q_{\text{рез}} + 970, \quad (5)$$

$$Q_{\text{обр}} = Q_{\text{пр}} - Q_{\text{рез}}. \quad (6)$$

Здесь $Q_{\text{пр}}$ — прямой поток, направленный из лимана в море, м³/с; $Q_{\text{обр}}$ — обратный поток (из моря в лиман), м³/с; $Q_{\text{рез}}$ — результирующий перенос, м³/с, равный их разности.

Для определения годовых значений водо-, соле- и теплообмена между Днепровско-Бугским лиманом и прилегающей частью взморья использовалось уравнение водного баланса лимана в упрощенном виде

$$W_{\text{рез}} = W_{\text{рек}} + W_{\text{ос}} - W_{\text{ис}}, \quad (7)$$

где $W_{\text{рез}}$ — результирующий перенос воды за год через пролив, равный разности между объемом прямого ($W_{\text{пр}}$) и обратного потока ($W_{\text{обр}}$), км³; $W_{\text{рек}}$ — суммарный сток рек Днепр, Южный Буг, Ингул и Ингулец, км³; $W_{\text{ос}}$, $W_{\text{ис}}$ — объем осадков и испарившейся воды, км³. При расчетах баланса воды Днепровско-Бугского лимана $W_{\text{пр}}$ входит в расходную, $W_{\text{обр}}$ — в приходную части баланса.

$Q_{\text{рез}}$ получено путем деления годового значения $W_{\text{рез}}$ на продолжительность года (31.54×10^6 с), а затем по нему с помощью уравнений (5) и (6) рассчитаны средние годовые величины $Q_{\text{пр}}$ и $Q_{\text{обр}}$.

Так как измерения расходов воды в Кинбурнском проливе осуществлялись при различном суммарном стоке рек и ветре, они получены при комплексном воздействии всех основных факторов водообмена и являются интегральной характеристикой переноса воды через сечение пролива. Это позволило упростить расчеты водообмена и не дифференцировать его по отдельным составляющим (стоковой, ветровой и пр.), как делалось ранее авторами [15, 12, 6].

В отличие от водообмена, значения переноса тепла и солей, полученные по натурным наблюдениям в проливе, можно использовать только для анализа краткосрочных изменений. Расчет средних многолетних значений составляющих тепло- и солеобмена (для оценки баланса) по непосредственным измерениям ингредиентов в проливе, как это было сделано ранее в работе [8], дает приближенные результаты. По-видимому, это объясняется тем, что смешение разнородных вод (по температуре и солевому составу) не сказывается на направлении преобладающего переноса (превалирует адвекция воды вдоль продольной оси пролива), так как скорости течения в устье пролива увеличиваются. В то же время увеличивается турбулентная диффузия контактирующих потоков и изменчивость всех характеристик, процессы взаимодействия и смешения пресных и соленых вод усложняются, количество движения, солей и тепла передаются не только вдоль пролива, но и осуществляется обмен между прямым и обратным потоками (например, соленость прямого потока увеличивается, а обратного уменьшается). Следовательно, разнородность смешивающихся водных масс в проливе существенно влияет на точность определения средней солености (или температуры) разнонаправленных потоков.

Поэтому средние многолетние составляющие обмена теплом и солями через Кинбурнский пролив рассчитывались путем умножения средней температуры (солености) верхнего слоя воды в лимане, перемещающейся к морю, или придонного слоя воды прилегающей северо-западной части Черного моря, перемещающейся в лиман, на прямой или, соответственно, обратный расход воды в проливе.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

На основе комплексного анализа изменчивости стока р. Днепр, течений, уровня, солености воды в проливе [8] установлено, что основными факторами формирования течений в проливе являются: изменения уровня волнового генезиса (приливы-отливы, сгоны-нагоны, сейши и др.), сток р. Днепр, разность плотности морской и пресной воды. Оба последних фактора (в отличие от ветра) являются постоянно действующими. Сток р. Днепр создает перепад уровня воды между

дельтой р. Днепр и Кинбурнским проливом, обусловливая стоковые, градиентные течения, часто усиленные преобладающими сгонными ветрами. В придонном слое более плотные морские воды поступают в лиман. При этом чем больше градиент плотности (соленость придонной воды), тем интенсивнее плотностные течения. Сток р. Днепр имеет суточные и недельные колебания из-за особенностей работы гидроузлов Каховской ГЭС (снижение нагрузки ночью и в выходные дни приводит к его уменьшению и падению уровня воды на устьевом участке р. Днепр). Влияние короткопериодной изменчивости попусков Каховской ГЭС на уровень воды в лимане и течения пока недостаточно изучено. Установлено лишь, что уровень воды у нижней границы дельты р. Днепр (с. Касперовка) практически не коррелируется с величинами попусков Каховской ГЭС, так как волна попуска расплывается на устьевом участке реки и в устьевых водотоках [4, 6, 8, 12, 16].

Постоянно действующим фактором также являются приливы и отливы. Несмотря на незначительность их воздействия на уровень (его изменения в г. Очакове составляют 5–17 см [16, 2]), можно считать, что вывод Тимченко [16] о существенной роли приливов и отливов в обменных процессах между лиманами и морем подтверждается, так как отмечается полусуточная цикличность в смене направления течений и дважды в сутки изменяется направление переноса [8]. Анализ, выполненный в работе [2], также показал, что в районе Кинбурнского пролива наблюдаются приливы, имеющие полусуточный характер, и они распространяются вдоль северо-западного побережья с запада на восток.

Действие приливов и отливов усиливается бризами, особенно в теплый период года, когда и выполнялось наибольшее количество измерений расхода воды, тепла и солей в створе Кинбурнского пролива. Только устойчивый продолжительный и сильный ветер (средней повторяемостью 3–4% в год) вносит существенные изменения в сложившуюся систему течений (рис. 1). Устойчивые сгонно-нагонные ветра, со скоростями 10–15 м/с и более, нарушают периодичность изменения составляющих обмена внутри суток — устанавливается однонаправленный поток, который после ослабления действия ветра быстро замещается компенсационным потоком обратного направления [4, 7, 8].

Обобщение результатов наблюдений в проливе показало наличие преобладающих течений и распределение изотак в его поперечном сечении, которые свидетельствуют о превалировании двухслойного потока (рис. 1): прямого (от поверхности до глубины 5.5 м) и обратного (от 5.5 м до дна). Оказалось, что “ядро” переноса (максимальные скорости течения) прямого направления распола-

гается в верхнем 2-метровом слое, а максимальный перенос обратного направления имеет два “ядра” – в слое 7–8 м и в придонном слое. Активизация обратного потока в придонном слое, очевидно, связана с действием градиента плотности (у дна в лиман поступает наиболее плотная и соленая вода), который обуславливает возникновение плотностных течений.

Комплексное воздействие указанных ранее факторов иногда приводит к тому, что картина переноса через пролив усложняется, по глубине нулевое значение скорости и изменение направления течения наблюдается 2 и более раза (рис. 1а). Повторяемость таких ситуаций – около 27%.

Перенос воды, тепла и веществ через пролив характеризует преобладающее поле течений, показанное на рис. 1б и 1в. Наличие глубоководного судоходного канала и обуславливает постоянство обратных течений и обратного потока.

Результаты расчетов прямых, обратных и результирующих расходов воды, тепла и солей в створе Кинбурнского пролива свидетельствуют о большой изменчивости всех составляющих обменных процессов. Расход воды здесь изменялся в пределах $\pm 13000 \text{ м}^3/\text{с}$, тепла – от 112×10^{10} до -58×10^{10} Вт, солей – от 150 до 111 т/с. Коэффициент вариации расхода воды, солей и тепла в проливе любого направления составлял 1.1–1.2. В рассматриваемый период значимых тенденций расходов воды, тепла и солей не обнаружено.

Анализ суточного хода обмена через пролив показал, что максимальный сток воды, тепла и солей из Днепровско-Бугского лимана в море отмечается в 3 ч, минимальный – в 18 ч местного времени. Ночью и ранним утром уровень воды в вершине Днепровского лимана и ее соленость в Кинбурнском проливе минимальны. В это время уровень воды в лимане интенсивно понижается, т.к. наблюдается ее максимальный отток из лимана. К 6 ч перепад уровня вдоль оси Днепровского лимана уменьшается в среднем до 0.7 см, и в 9 ч наблюдается минимальный уровень в районе пролива. В это время уровень воды у нижней границы дельты р. Днепр увеличивается, снижается роль прямого потока в обмене через пролив и возрастает вклад обратного потока, который к 18 ч достигает максимальных значений. Интенсивность роста уровня воды увеличивается, его перепад вдоль оси лимана имеет максимальное значение 7 см в 21 ч. Суточный ход уровня воды, течений и солености [8] согласуется с указанными особенностями водообмена через Кинбурнский пролив. В то же время, сток р. Днепр имеет максимум с 18 до 22 ч, минимум – с 3 до 8 ч. Связи между средними суточными расходами р. Днепр и уровнями в лимане (даже в его вершине, у нижней границы дельты) не обнаружено, что свидетельствует о преобладающем влиянии водообме-

на через пролив на уровень воды в лимане и его вершине в суточном диапазоне изменчивости.

Ход расчетных значений обмена через пролив так же, как и измеренных, подтверждает наличие мелкомасштабной изменчивости его составляющих. В 14–15 ч происходит смена направления результирующего потока: сток из лимана сменяется притоком в лиман. Обратный поток воды, тепла и веществ в лиман доминирует с 15 до 21 ч, а в 22–23 ч результирующий поток изменяет направление на противоположное – из лимана в море. В периоды смены направления потока результирующая равна нулю. В краткосрочных изменениях водо-, соле- и теплообмена доминируют полусуточные и суточные колебания прямого и обратного расхода воды, тепла и солей. Основной вклад в эти изменения вносит расход воды через пролив.

Для практического применения полученных результатов рассчитана повторяемость и обеспеченность расходов воды прямого и обратного направлений переноса через Кинбурнский пролив [8]. Установлено, что 45% расходов воды прямого направления и 56% обратного не превышают $1000 \text{ м}^3/\text{с}$. Вероятность однонаправленного прямого потока составляет 14%, обратного – 6%, в проливе преобладает разнонаправленный перенос воды.

Оказалось, что при прямом расходе воды, равном $5000 \text{ м}^3/\text{с}$, в устье судоходного канала отмечается клин соленой воды, перемещающийся в лиман. Прямой поток “закрывает” обратный (то есть его величина равна нулю) при $5400 \text{ м}^3/\text{с}$, и равен нулю при достижении обратным значения $4500 \text{ м}^3/\text{с}$, что обусловлено большей плотностью (массой) соленой воды, поступающей в виде клина по каналу, и тем, что расходы прямого потока в среднем превышают расходы потока обратного направления.

Средние месячные расходы воды в Кинбурнском проливе зависят от расхода воды р. Днепр. Чем больше его величина, тем больше прямой поток из Днепровско-Бугского лимана в море и меньше поступление воды в обратном направлении. Влияние других составляющих на этом масштабе осреднения имеет меньшее значение, т.к. оно взаимно нивелируется (например, приливы-отливы, сгоны-нагоны, сейши). Для периода с апреля по ноябрь получены зависимости средних месячных расходов воды через Кинбурнский пролив (прямого, обратного и результирующего) от среднего месячного расхода воды р. Днепр, имеющие коэффициенты корреляции 0.95–0.96 и вид

$$Q_{\text{пр}} = 1.7Q_{\text{Дн}} + 186, \quad (8)$$

$$Q_{\text{обр}} = -0.9Q_{\text{Дн}} + 2230, \quad (9)$$

$$Q_{\text{рез}} = 2.6Q_{\text{Дн}} - 2035, \quad (10)$$

Таблица 2. Характеристика водо-, соле- и теплообмена в Кинбурнском проливе

Составляющая переноса	Адвекция за год		
	воды, км ³	тепла, 10 ¹⁵ Дж	солей, млн т
Прямой поток	59.0	2860	224
Обратный поток	13.6	670	209
Результирующий поток	45.4	2190	15
Суммарный перенос	72.6	3530	433

где $Q_{пр}$, $Q_{обр}$, $Q_{рез}$ – средний месячный прямой, обратный и результирующий расход воды в Кинбурнском проливе, м³/с; $Q_{дн}$ – средний месячный расход воды р. Днепр у Каховской ГЭС, м³/с.

Полученные зависимости приемлемы для приближенной оценки средних месячных составляющих водообмена в проливе (в теплый период года), в диапазоне средних месячных расходов воды р. Днепр от 500 до 2400 м³/с. Средние многолетние (за период с 1965 по 2011 гг.) месячные расходы воды р. Днепр изменялись от 760 м³/с (сентябрь) до 1940 м³/с (май). С учетом их изменчивости, характеризующейся коэффициентами вариации 0.30–0.70 [8], полученные зависимости охватывают 72% амплитуды колебаний средних месячных расходов р. Днепр.

Средние месячные расходы тепла в проливе зависят не только от расхода воды р. Днепр, но и от температуры воды. Поэтому в сезонном ходе расхода тепла прямого направления отмечается два пика – при максимуме прямого потока воды (в мае) и при максимальной температуре воды (в июле). Влияние температуры воздуха на глубоководные слои сказывается в меньшей степени, поэтому средний месячный расход тепла обратного направления изменяется так же, как расход воды и солей.

Средний месячный расход воды р. Днепр оказывает влияние и на расход солей в Кинбурнском проливе. В период повышенной водности рек происходит распреснение поверхностного слоя воды и величина расхода солей в море уменьшается, несмотря на увеличение прямого потока. Отток воды и солей из лимана компенсируется поступлением в придонном слое обратного потока, меньшего по объему, чем прямой, но имеющего значительно большую соленость, поэтому в мае–июне расходы солей прямого и обратного потока имеют близкие значения. В межень, когда сток рек минимален, солеобмен через Кинбурнский пролив увеличивается. Результаты расчета средних за многолетний период составляющих водо-, соле- и теплообмена представлены в табл. 2.

При суммарном стоке рек, равном 45.8 км³, и потерях при водообмене с атмосферой в объеме 0.50 км³, в среднем за год в лиман через пролив поступает 13.6 км³, а из лимана в море – 59.0 км³. Невязка баланса (–0.1 км³) составляет около 3% от среднего объема лимана и обусловлена недоучетом склонового стока, притока подземных и сточных вод, погрешностями расчета.

Полученные результаты, приведенные в табл. 2, хорошо согласуются с данными Журавлевой и Копайгородского (табл. 1), использовавших для определения значений водообмена в Кинбурнском проливе другой метод – решение уравнений водного и солевого балансов [3, 5].

Сравнение результатов расчета современного водообмена с данными, полученными Копайгородским [5] для периода естественного стока рек, а также с его прогнозом водообмена после сооружения днепровских водохранилищ, свидетельствует о достоверности результатов, так как очевидно, что уменьшение годового стока рек, обусловленное его регулированием и безвозвратными изъятиями, снижение ветровой активности [2], повышение уровня Черного моря [2] способствовали уменьшению прямого и увеличению обратного потока через Кинбурнский пролив [8].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, многолетние и сезонные величины переноса воды, тепла и солей в створе Кинбурнского пролива зависят от водности рек (чем больше сток, тем больше прямой поток через пролив и меньше обратный), а краткосрочные – от суточной циркуляции вод, имеющей длинноволновый характер различного генезиса.

На основе зависимости притока воды в Днепровско-Бугский лиман из прилегающей части Черного моря и стока из лимана в море от интенсивности изменения уровня воды в вершине лимана, являющейся интегральной характеристикой воздействия всех факторов, влияющих на обменные процессы в проливе, предложен метод расчета прямых и обратных расходов воды дискретностью 1 час и более.

На примере расчета расходов тепла в проливе показана принципиальная возможность определения переноса тепла, солей, растворенных и взвешенных веществ по зависимостям последних от средней (на период измерения расхода) интенсивности изменения уровня воды в вершине лимана и измеренных в районе пролива значений температуры, солености и др. характеристик (минутная расчет расходов воды).

Получена зависимость прямого и обратного потоков в проливе от результирующего, и рассчитан средний многолетний (с 1965 по 2011 гг.) баланс воды Днепровско-Бугского лимана по наи-

более длинным рядам наблюдений. С использованием указанных зависимостей также рассчитаны средние многолетние величины составляющих водообмена в проливе, которые составили для прямого потока 59.0 и 13.9 км³ для обратного потока.

Результаты работы послужили основой для расчета современного баланса солей, тепла, взвешенных, биогенных и загрязняющих веществ в Днепровско-Бугском лимане.

Полученные зависимости могут быть использованы для расчета величины обмена за весь период наблюдений по ежечасным уровням на водопосту Касперовка (с 1975 г.), восстановления пропусков в наблюдениях (например, в зимний период) и выполнения прогнозных оценок изменения водообмена в Кинбурнском проливе в зависимости от изменения стока р. Днепр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаков В.С.* Трансформация речных вод в Черном море. К.: Наукова думка, 1970. 328 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. 430 с.
3. *Журавлева Л.А.* Гидрохимия устьевой области Днепра и Южного Буга в условиях зарегулированного речного стока. К.: Наукова думка, 1988. 173 с.
4. *Иванов В.А., Миньковская Р.Я.* Морские устья рек Украины и устьевые процессы. Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2008. 806 с.
5. *Копайгородский Е.М.* Изменение водного баланса и солености Днепро-Бугского лимана в связи с регулированием стока р. Днепра // Тр. Гос. океаногр. института. 1955. Вып. 020. С. 79–124.
6. *Костяницын М.Н.* Гидрология устьевой области Днепра и Южного Буга. М.: Гидрометеоиздат, 1964. 336 с.
7. *Миньковская Р.Я.* Преобладающие течения в устьевых областях рек Дунай, Бельбек, Черная, Днепр и Южный Буг // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. Вып. 15. С. 194–203.
8. *Миньковская Р.Я.* Океанография морского устья рек Днепр и Южный Буг. Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2011. 515 с.
9. *Миньковская Р.Я., Демидов А.Н.* Методика расчета обмена через двухмерные обменные проливы на примере теплообмена // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 1999. 67–71
10. *Морозов В.И., Симов В.Г.* Течения в Кинбурнском проливе // Тр. Гос. океаногр. института. 1987. Вып. 180. С. 59–70.
11. *Розенгурт М.Ш.* Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов Одесских лиманов. К.: Наукова думка, 1974. 224 с.
12. *Розенгурт М.Ш., Толмазин Д.М.* Перспективы и методы исследования водо- и солеобмена Днепровского лимана с Черным морем. К.: Наукова думка, 1971. 46 с.
13. *Симов В.Г., Морозов В.И., Миньковская Р.Я и др.* Обмен энергией и веществами между устьевыми водоемами и сопредельными морями в условиях антропогенного воздействия // Охрана природной среды морей и морских устьев рек. Владивосток, 1986. С. 37–46.
14. *Слатинский Ю.Г.* Материалы и статьи по гидрологическому режиму Днепро-Бугского лимана: Препринт. Севастополь: ГМО ЧАМ, 1962. 128 с.
15. *Слатинский Ю.Г.* Об обмене вод между Днепро-Бугским лиманом и Черным морем // Гидрофиз. и гидрохим. исследования в Черном море. М.: Наука, 1967. С. 48–50.
16. *Тимченко В.М.* Экологическая гидрология водоемов Украины. К.: Наукова думка, 2006. 384 с.

Of Charges of Water, Salts and Heat in the Kynburnskiy Channel of the Dneprovsko-Bugskiy Estuary

R. Ya. Minkovskaya, A. N. Demidov

On the basis of long-term supervisions (1965–2011 day's), seasonal and annual changeability of charges of water, salts and heat in the Kynburnskiy channel of the Dneprovsko-Bugskiy estuary is studied. The method of calculation is offered and specified value of water-, salts- and heat exchange through a channel, for the decision of the practical tasks related to the rational use of waters resources of this mouth region.