

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.54

ВНУТРЕННИЙ И ВНЕШНИЙ ВОДООБМЕН В НЕПРИЛИВНЫХ РЕЧНЫХ ДЕЛЬТАХ¹

© 2019 г. М. В. Михайлова^{1,*}, М. В. Исупова^{1,**}

¹Институт водных проблем РАН
Москва, 119333 Россия

e-mail: *mv.mikhailova@gmail.com; **misupova@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.03.2019 г.

После доработки 30.05.2019 г.

Принята к публикации 16.06.2019 г.

Рассмотрены типы и особенности внутреннего и внешнего водообмена в неприливых дельтах. Приведены результаты гидравлического расчета водообмена в системе рукав–проток–дельтовое озеро. Выводы подтверждены данными наблюдений в ряде крупных неприливых и микроприливых дельт.

Ключевые слова: река, дельта, рукав, проток, дельтовый водоем, внутренний и внешний водообмен.

DOI: 10.31857/S0321-0596466575-581

ВВЕДЕНИЕ

Любая крупная неприливая дельта обладает сложной гидрографической сетью, состоящей, как правило, из двух частей. Первая часть — это системы разветвляющихся и сливающихся рукавов, переносящих транзитом воды реки в приемный водоем (море, крупное озеро). В этих рукавах в неприливых дельтах движение вод всегда одностороннее — в сторону моря (озера). Вторая часть — это система небольших протоков, которые соединяют между собой рукава, рукава и дельтовые озера, смежные озера, дельтовые озера и лагуны с морем. В зависимости от фазы гидрологического режима реки (половодье–межень, сгон–нагон) водный поток изменяет свое направление. Такое двустороннее движение вод и их обновление в дельтах авторы статьи называют внутренним и внешним водообменом. Этот процесс имеет большое гидроэкологическое научное и практическое значение, но изучен еще недостаточно. В статье впервые предпринята попытка теоретического (с использованием методов речной гидравлики) исследования рассматриваемого процесса.

Основные задачи статьи состоят в следующем:

- 1) предложить типизацию внутреннего и внешнего водообмена в крупных неприливых дельтах и выявить его особенности;
- 2) изложить результаты упрощенного расчета внутреннего водообмена в системе рукав–проток–дельтовое озеро;
- 3) привести конкретные примеры внутреннего и внешнего водообмена, подтверждающие по результатам наблюдений изложенные в статье теоретические и методологические выводы.

ТИПЫ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО ВОДООБМЕНА В НЕПРИЛИВНЫХ ДЕЛЬТАХ

Для крупных неприливых дельт характерны четыре типа внутреннего водообмена.

Первый тип. Двусторонний сезонный водообмен в системе дельтовый рукав–проток–дельтовое озеро (или крупные болота и плавни). В половодье водный поток направлен в сторону озера, в межень — в противоположную сторону (к рукаву). Закономерности процесса водообмена в рассматриваемой системе (типичной для дельт) выявлены путем упрощенного гидравлического расчета, изложенного в следующем разделе, и подтверждены данными надежных наблюдений в дельтах Волги и Дуная. Установлено,

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИВП РАН (Тема № 0147-2019-0001, № государственной регистрации АААА-А18-118022090056-0).

в частности, что величина переменного расхода в протоке пропорциональна корню квадратному уклону водной поверхности в протоке.

Второй тип. Двусторонний сезонный водообмен через проток между двумя рукавами дельты. К сожалению, надежных данных наблюдений для этого типа водообмена в литературе не обнаружено.

Третий тип. Двусторонний сезонный или кратковременный (зависящий от силы и направления ветра) водообмен через проток между двумя дельтовыми озерами. Данные наблюдений для этого типа в литературе также отсутствуют.

Четвертый тип. Двусторонний сезонный водообмен между дельтовым рукавом (с одной стороны) и смежной необвалованной низменной частью дельтовой равнины и находящимися под ней водоносными горизонтами (с другой стороны). В половодье часть дельтовой равнины затопляется, в межень — опорожняется. Разность в объемах воды, пошедшей на затопление и вернувшейся в рукав, зависит от климатических условий. Если осадки превышают потери на испарение, то в рукав возвращается воды больше, чем пошло на затопление, годовой русловой водный баланс положительный. Если же потери на испарение превышают осадки, то годовой русловой водный баланс отрицательный.

Единственный возможный тип внешнего водообмена в крупных неприливых дельтах — сезонный или кратковременный (сгон, нагон), а также двусторонний обмен вод через короткий проток (пролив, гирло) между дельтовым озером или дельтовой лагуной (с одной стороны) и устьевым взморьем (с другой). В половодье или при сильном сгонном ветре водный поток направлен в море, а в низкую межень или при сильном нагонном ветре — либо в дельтовое озеро, либо в дельтовую лагуну. В статье ниже приведен пример такого типа внешнего водообмена.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВНУТРЕННЕГО ВОДООБМЕНА В АБСТРАКТНОЙ СИСТЕМЕ РУКАВ–ПРОТОК–ДЕЛЬТОВОЕ ОЗЕРО

Рассмотрим фрагмент неприливной дельты, состоящий из крупного рукава с обвалованной поймой, большого озера и длинного и узкого протока с переменным течением, соединяющего рукав и озеро (рис. 1).

С целью выявления основных особенностей водообмена в рассматриваемой системе исполь-

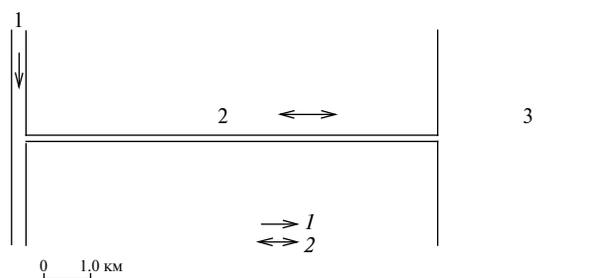


Рис. 1. Схема фрагмента неприливной дельты. 1 — рукав, 2 — проток, 3 — озеро; 1 — направление течения в рукаве, 2 — направление течения в протоке.

зуем упрощенные гидравлические методы. Для этого примем следующие допущения.

1. Годовой цикл гидрологического режима рукава поделен на две разные по длительности, но близкие по суммарному объему стока фазы: многоводную (половодье) и маловодную (межень). Критерием выделения этих фаз служит среднегодовое количество расхода воды в рукаве.

2. Глубина и уровень в рукаве в месте ответвления протока и в начале протока — функция расхода воды в рукаве.

3. Уровень воды в большом и глубоком озере в течение года неизменен и равен уровню в конце протока, а также в рукаве и в начале протока, соответствующему среднегодовому расходу воды в рукаве.

4. Направление и величина расхода воды в протоке зависят от знака и величины разности уровней в начале и в конце протока. В многоводную фазу водного режима рукава течение в протоке направлено из рукава в озеро, в маловодную фазу — из озера в рукав.

5. Регион, в котором расположена рассматриваемая дельта, относится к области недостаточного увлажнения, что типично для большей части умеренного климатического пояса, поэтому водный баланс рассматриваемой дельты отрицательный [5, 7]. Если по результатам гидравлического расчета окажется, что объем стока, поступающего по протоку в озеро в многоводную фазу, превышает объем стока, возвращающегося в рукав в маловодную фазу, то это должно быть объяснено влиянием видимого испарения с озера (разности испарения с его поверхности и атмосферных осадков).

6. Гидравлический режим в протоке при любом направлении в нем потока в действительности неравномерный, но для упрощения расчета принят квазиравномерным. В рукаве гидравлический режим всегда квазиравномер-

ный. Эти допущения позволяют использовать уравнение Шези–Маннинга и для рукава, и для протока.

Считаем, что у рукава поперечное сечение прямоугольной формы, его ширина — B (м), песчаное дно имеет постоянный уклон i в сторону моря и коэффициент шероховатости — n (с/м^{1/3}). Изменения среднемесячных расходов воды в рукаве Q (м³/с) зададим ступенчатым графиком по аналогии с расходами воды в средних рукавах дельты Дуная [2].

Первая задача, которую надо решить, — это расчет среднемесячных уровней воды H_1 (м) в начале протока. Для такого расчета воспользуемся уравнением Шези–Маннинга:

$$V = C\sqrt{hI} = \frac{h^{1/6}}{n}\sqrt{hI}, \quad (1)$$

где V , м/с — средняя скорость потока; h , м — глубина русла; I — уклон водной поверхности.

В формуле (1) заменим глубину h на глубину квазиравномерного потока (или “нормальную” глубину) h_0 , V — на $\frac{Q}{Bh_0}$, I — на i (при равномер-

ном режиме уклоны водной поверхности и дна в рукаве совпадают). В результате получим

$$\frac{Q}{Bh_0} = \frac{h_0^{1/6}}{n}\sqrt{h_0i}.$$

После преобразования имеем:

$$h_0 = \left(\frac{Qn}{B\sqrt{i}}\right)^{0.6}. \quad (2)$$

Отметки дна рукава у начала протока примем за ноль отсчета для глубины русла рукава h_0 и, соответственно, уровня H_1 в рукаве и начале протока. Тогда уровень воды H_1 при любой величине Q и неизменных величинах B , n и i будет выражен так:

$$H_1 = h_0 = Q^{0.6}A, \quad (3)$$

$$\text{где } A = \left(\frac{n}{B\sqrt{i}}\right)^{0.6}.$$

Задаем условия для рукава: $B = 200$ м, $n = 0.02$ с/м^{1/3}, $i = 2 \times 10^{-5}$. Результаты расчета среднемесячных величин H_1 и h_0 , соответствующих среднемесячному Q в рукаве, приведены в таблице.

Среднегодовой расход воды в рукаве Q оказался равным 1080 м³/с. Тогда периоды многоводной фазы водного режима рукава — март, апрель, май, июнь, июль, маловодной — август–февраль.

Решение второй задачи более сложное — разработка способа расчета разных по величине и переменных по знаку среднемесячных расходов воды в протоке q (м³/с). Этот расход зависит от разности уровней в начале протока H_1 и в его конце H_2 . Среднемесячные уровни H_1 в рукаве и в начале протока приведены в таблице. Сред-

Таблица. Результаты расчета внутреннего водообмена во фрагменте дельты

Месяц	Q , м ³ /с	W_Q , 10 ⁹ м ³	h_0, H_1 , м	H_2 , м	$H_1 - H_2$, м	h_1 , м	h_2 , м	h_m , м	n_c	q , м ³ /с	W_q , 10 ⁶ м ³
I	950	2.544	6.24	6.76	-0.52	2.44	2.96	2.70	0.04	-9.47	-25.4
II	1000	2.419	6.44	6.76	-0.32	2.64	2.96	2.80	0.04	-7.88	-19.1
III	1200	3.214	7.18	6.76	0.42	3.38	2.96	3.17	0.04	11.1	29,8
IV	1480	3.836	8.14	6.76	1.38	4.34	2.96	3.65	0.04	25.5	6.62
V	1540	4.125	8.34	6.76	1.58	4.54	2.96	3.75	0.08	28.6	76.5
VI	1320	3.421	7.60	6.76	0.84	3.80	2.96	3.38	0.08	17.5	45.4
VII	1100	2.946	6.81	6.76	0.05	3.01	2.96	2.99	0.08	3.48	9.31
VIII	890	2.384	6.00	6.76	-0.76	2.20	2.96	2.58	0.08	-10.6	-28.0
IX	770	1.996	5.50	6.76	-1.26	1.70	2.96	2.33	0.08	-11.5	-3.00
X	820	2.196	5.71	6.76	-1.05	1.91	2.96	2.44	0.04	-11.3	-30.4
XI	920	2.385	6.12	6.76	-0.64	2.32	2.96	2.64	0.04	-10.1	-26.2
XII	1020	2.732	6.51	6.76	-0.25	2.71	2.96	2.84	0.04	-7.13	-19.1
год	1080	2.850	6.76								

немесячные уровни в озере H_2 одинаковы и равны среднегодовому уровню в рукаве $H_1 = 6.76$ м (таблица).

Для расчета величины q также используем уравнение Шези—Маннинга вида (1). Для этого умножим левую и правую его части на bh_m ; b (м) — ширина принятого прямоугольным русла протока, h_m (м) — средняя глубина в протоке, равная $(h_1 + h_2)/2$, где h_1 и h_2 — глубины в начале и конце протока. Кроме того, корень квадратный из уклона водной поверхности заменим на

$(k\sqrt{|H_1 - H_2|})/\sqrt{l}$, где l , м — длина протока,

k — коэффициент, учитывающий знак разности $H_1 - H_2$. Если $H_1 > H_2$, то $k = +1$, в этом случае $q > 0$ и поток в протоке направлен в сторону озера. Если $H_1 < H_2$, то $k = -1$, $q < 0$ и поток в протоке направлен от озера к рукаву.

В итоге получим уравнение:

$$q = \frac{bh_m^{1.67} k \sqrt{|H_1 - H_2|}}{n_c \sqrt{l}}, \quad (4)$$

где n_c — коэффициент шероховатости дна протока.

В естественных условиях дно протоков, соединяющих дельтовые рукава и озера, может понижаться как в сторону рукава, так и в сторону озера. Авторы статьи приняли продольный профиль дна протока горизонтальным, а его отметку $H_c = 3.80$ м. Тогда глубины h_1 в начале протока и h_2 в конце протока можно вычислить по формулам $h_1 = H_1 - 3.80$ м и $h_2 = H_2 - 3.80$ м. Результаты расчета h_1 , h_2 , h_m приведены в таблице.

Для расчета q зададим для протока $b = 10$ м, $l = 10\,000$ м. В теплые месяцы года (май—сентябрь) небольшой по размерам проток сильно зарастает водной растительностью, поэтому в указанные месяцы коэффициент шероховатости его русла n_c возрастает и принят равным 0.08. В остальные месяцы $n_c = 0.04$. Результаты расчета q содержатся в таблице.

Полученные результаты расчета q позволили подтвердить правильность выбора отметки дна протока H_c , равной 3.8 м и неизменной по всей его длине. Для этого дополнительно сделано следующее: для двух экстремальных случаев (наибольшей положительной величине q в мае и наибольшей отрицательной величине q в сентябре) рассчитаны средние скорости течения V в конце протока в мае ($V = q / bh_2 = 0.966$ м/с) и в нача-

ле протока в сентябре ($V = q / bh_2 = -0.676$ м/с). Этим величинам V соответствуют числа Фруда ($Fr = V^2 / gh$) в конце и начале протока, равные 0.032 и 0.027, т.е. в том и другом случае $Fr < 1$. Это означает, что в обоих экстремальных случаях поток в конце и в начале протока не достигает критического состояния и водопадов не возникает, в чем и требовалось удостовериться. В другие месяцы величины V и Fr оказались еще меньше.

По результатам расчета q определяем суммарные объемы стока в протоке за многоводную и маловодную фазы режима. В итоге получаем, что в многоводную фазу по протоку в озеро поступает 167.7×10^6 м³ водного стока, а в маловодную в рукав возвращается 151.6×10^6 м³. Таким образом, объем стока, поступивший в озеро, оказывается больше вернувшегося в рукав на 16.1×10^6 м³. Примем площадь озера равной 40×10^6 м². Тогда годовой слой видимого испарения с озера составит 402 мм, что соответствует приближенной величине видимого испарения, характерного для водоемов в дельте Дуная, где среднегодовые величины атмосферных осадков и потерь на испарение соответственно равны 396 и 807 мм [5].

Рассчитанные расходы воды в протоке q оказались небольшими по сравнению с расходами воды в рукаве Q . Так, в случае, когда расход q при впадении в озеро максимальный (май), или когда, наоборот, обратный поток в рукав небольшой (сентябрь), доли q в протоке составляют от Q всего -1.86 и $+1.49\%$. Поэтому сток по протоку как в сторону озера, так и обратно не может заметно повлиять на сток в рукаве ниже по течению.

По результатам расчета построены продольный профиль дна протока и продольные профили водной поверхности в характерные месяцы (рис. 2). Эти линии свободной поверхности условно приняты прямолинейными, хотя в действительности они должны быть выпуклыми кривыми спада.

Для приближенного расчета расхода воды в протоке q по заданным величинам перепада уровня на концах протока $H_1 - H_2$ по данным таблицы получена эмпирическая связь $q = 16.1(H_1 - H_2) + 2.20$ при высоком коэффициенте корреляции $-r = 0.974$.

ПРИМЕРЫ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО ВОДООБМЕНА В КРУПНЫХ НЕПРИЛИВНЫХ ДЕЛЬТАХ

Примером реального внутреннего водообмена, схожим с рассмотренным выше абстрактным

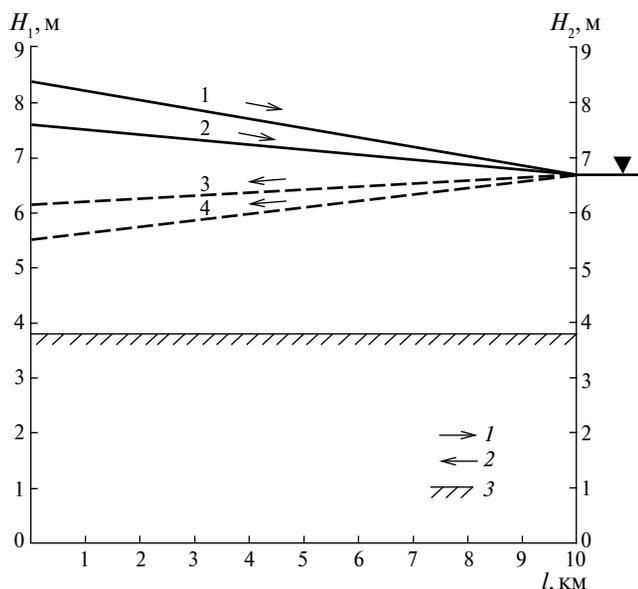


Рис. 2. Характерные профили водной поверхности в протоке в мае (1), июне (2), ноябре (3), сентябре (4). 1 — поток направлен в сторону озера, 2 — поток направлен в сторону рукава, 3 — дно протока.

случаем, может быть описанный в [4] водообмен между Тульчинским рук. и озерно-плавневым комплексом Лунг (Lung, рум.) в румынской части дельты Дуная через проток Перетяжка (Periteaşca, рум.) с переменным течением. Результаты гидрологических экспедиций позволили установить, что в период повышенного стока (с апреля по июль 1959 г. и с января по август 1960 г.) направление стока по протоку было из рукава в озерно-плавневый комплекс, а в период пониженного стока — в сторону рукава. Кроме того, по итогам этих экспедиций стало возможным количественно оценить объемы воды, поступающей по протоку в озера и плавни и возвращающейся из них в рукав. Также установлено, что направление и расход воды в протоке зависят от знака и величины корня квадратного из разности уровней на его концах.

Другим примером внутридельтового водообмена может служить связь крупного правого рукава дельты Волги Бахтемир с обширным правобережным озерным комплексом Западные подстепные ильмени. Этот комплекс площадью ~4200 км² представляет собой совокупность множества замкнутых и полужамкнутых (проточных) водоемов (ильменей), как правило, небольшого размера. Длина ильменей от нескольких сотен метров до нескольких километров, ширина 150–1000 м, средняя глубина от 0.5–1.0 м в межень до 2.0–3.5 м в половодье [1]. Ильмени соединяются между собой узкими протоками (ериками).

Вода в период половодья поступает из рук. Бахтемир в ильмени по русловой сети протоков, главный из которых Хурдун. В межень часть воды возвращается в рук. Бахтемир, при этом некоторые протоки искусственно перекрываются для сохранения воды в ильменях.

Район ильменей очень засушливый, поэтому сток, возвращающийся в рукав, заметно меньше, чем сток из рукава в ильмени. В высокое половодье 1991 г. площадь максимального затопления в районе Западных подстепных ильменей составляла 1311 км², максимальный объем аккумуляции воды в ильменях — 1.31 км³, объем притока воды из рук. Бахтемир на подъеме половодья — 2.22 км³, объем оттока воды на спаде половодья — 0.61 км³, потери воды на испарение — 0.97 км³, осадки — 0.35 км³, потери воды на видимое испарение — 0.62 км³ [8].

Интересен случай внешнего водообмена между дельтовым озером или лагуной и устьевым взморьем. В дельте Дуная обширная лагуна Разельм соединяется с Черным морем через пролив (гирло) Портица (Portița, рум.). Эта лагуна в период повышенного стока Дуная наполняется речной водой через небольшие рукава или плавни. В это время уровень в лагуне повышается и сток через гирло поступает в море. Если же в меженный период уровень в прибрежной части моря оказывается выше, чем в лагуне, то морская вода поступает в лагуну. Поскольку этот процесс сильно нарушается стонно-нагонными явлениями в прибрежной зоне моря, режим пролива (гирла) оказывается очень неустойчивым и направление течения в нем часто меняет величину и знак. Переменный гидравлический режим водообмена через пролив (гирло) имеет некоторое сходство с водообменом приморских лагун (как дельтовых, так и иных), подверженных воздействию приливов. Хорошо изучен водообмен лагун с Атлантическим океаном через приливные проливы (“tidal inlets”). При полусуточных приливах смена направления течений в этих проливах происходит четыре раза в сутки.

К внутреннему водообмену в крупных неприливных и микроприливных дельтах (с величиной прилива <2 м) может быть также отнесено взаимодействие стока в необвалованных рукавах с грунтовыми водами и заливаемой частью необвалованной и низменной дельтовой равнины (поймы). На крупных реках взаимодействие речных и грунтовых вод называют русловым регулированием стока (в половодье речные воды питают смежные грунтовые воды, в межень — грунтовые воды возвращаются в русла рек).

Взаимодействие речных и грунтовых вод вместе с процессами затопления части дельтовой равнины в половодье и ее опорожнения в межень названо естественным дельтовым регулированием стока [2].

Детальные и надежные гидрометрические данные позволили в [2] оценить этот вид водообмена количественно. Килийский рук. в дельте Дуная ниже г. Вилково делится на две русловые системы — левого Очаковского рук. и правого Старостамбульского рук. Сравнение расходов воды в начале этих русловых систем с суммарным расходом воды всех частных рукавов в их приморской части показало, что в половодье водный сток вдоль систем уменьшается (происходит пополнение грунтовых вод и затопление части дельтовой равнины). В итоге в половодье водный баланс в русловых системах отрицательный. В межень ситуация обратная: в русло возвращаются грунтовые воды и опорожняется часть дельтовой равнины. В итоге в межень водный баланс в этих системах положительный: сток воды вдоль систем рукавов возрастает. В среднем за год водный баланс Очаковской и Старостамбульской систем рукавов (т.е. так называемой Килийской дельты Дуная) оказывается отрицательным: поступление водного стока в море меньше, чем сток в вершине Килийской дельты.

То же касается и всей дельты Дуная: объем стока в Черное море в среднем на $2.26 \text{ км}^3/\text{год}$ меньше, чем объем стока в вершине всей дельты [5]. Причина этого в том, что дельта Дуная находится в области недостаточного увлажнения (индекс сухости по М.И. Будыко равен 1.80, т.е. отношение испаряемости к осадкам >1) и в пределах дельты величина стока уменьшается.

Аналогичные условия характерны и для дельты Волги [5, 8]. До зарегулирования реки Волжско-Камским каскадом водохранилищ на подъеме половодья по небольшим рукавам и протокам волжская вода быстро затопляла обширные части дельты. На спаде половодья и в межень вода медленно возвращалась в крупные рукава дельты. Дельта Волги также находится в области недостаточного увлажнения (индекс сухости равен 3.80) [5], поэтому и в этой дельте водный баланс был (и остается) отрицательным. До 1960-х гг. в дельте ежегодно терялось в среднем 7.70 км^3 воды [5].

Подобные процессы характерны и для других дельт [7]. В условиях недостаточного увлажнения в регионе годовой водный баланс дельт от-

рицательный, как в дельтах Терека [8], Урала [8], Кубани [3]. В особо засушливых условиях отрицательный водный баланс в дельтах усугубляется крупным водозабором на орошение, как, например, в дельтах Хуанхэ [6], Инда, Колорадо. В условиях избыточного увлажнения (в дельтах Нигера и Амазонки) водный баланс положительный и водный сток в море возрастает.

ВЫВОДЫ

В крупных неприливных дельтах обычны случаи двустороннего внутреннего и внешнего водообмена между разными водными объектами. К внутреннему водообмену относятся, во-первых, сезонный обмен вод в системах рукав дельты—проток—дельтовое озеро; во-вторых, сезонный обмен через проток между рукавами; в-третьих, сезонный или кратковременный обмен вод через проток между двумя дельтовыми озерами; в-четвертых, сезонный водообмен между дельтовым рукавом и ближайшей низменной и затопляемой частью дельтовой равнины. Внешний сезонный или кратковременный водообмен вод возможен через проток (гирло) между дельтовым озером или лагуной и устьевым взморьем.

Разработан новый упрощенный гидравлический метод анализа и расчета внутреннего водообмена в дельтах на примере типового фрагмента неприливной дельты, состоящей из рукава, озера и соединяющего их узкого протока. Установлено, что в многоводную фазу годового водного режима (половодье) сток по протоку направлен в сторону озера, а в маловодную (межень) — обратно в рукав. Результаты расчета по формуле Шези—Маннинга позволили установить тесную связь расхода воды в протоке с величиной и знаком разности отметок уровня воды на концах протока.

Полученные теоретические выводы подтверждены данными наблюдений в ряде неприливных и микроприливных дельт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреховских В.Ф., Бухарицин П.П., Волкова З.В., Лабунская Е.Н. Экологические проблемы Западных подступных ильменей дельты р. Волги // Арид. экосистемы. 2010. Т. 16. № 3(43). С. 34–48.
2. Гидрология дельты Дуная. М.: ГЕОС, 2004. 448 с.
3. Гидрология дельты и устьевого взморья Кубани. М.: ГЕОС, 2010. 728 с.

4. Гидрология устьевой области Дуная. М.: Гидрометеоиздат, 1963. 383 с.
5. Михайлов В.Н. Влияние речных дельт на средне-многолетний водный сток рек // Вод. ресурсы. 2004. Т. 31. № 4. С. 389–394.
6. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Естественные и антропогенные многолетние изменения стока воды и взвешенных наносов р. Хуанхэ // Вод. ресурсы. 2017. Т. 44. № 6. С. 612–627.
7. Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. Основы гидрологии устьев рек. М.: Триумф, 2018. 313 с.
8. Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления. М.: ГЕОС, 2013. 702 с.

INTERNAL AND EXTERNAL WATER EXCHANGE IN NONTIDAL RIVER ESTUARIES

© 2019 M. V. Mikhailova^{1,*}, M. V. Isupova^{1,**}

¹*Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences
Moscow, 119333 Russia*

*e-mail: *mv.mikhailova@gmail.com; **misupuva@yandex.ru*

Received: 16.03.2019

Revised version received: 30.05.2019

Accepted: 16.06.2019

The types and specific features of the internal and external water exchange in nontidal deltas are discussed. The results of hydraulic calculation of water exchange in the branch–bypass–delta lake are given. The conclusions are confirmed by data of observations in several large nontidal and microtidal deltas.

Keywords: river, delta, branch, bypass, deltaic water body, internal and external water exchange

DOI: 10.31857/S0321-0596466575-581