

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ БОРА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПЕРЕНОС ОСОЛОНЕННЫХ ВОД В УСТЬЯХ РЕК¹

© 2013 г. Е. Н. Долгополова

Институт водных проблем РАН

119333 Москва, ул. Губкина, 3

E-mail: dolgopolova@gmail.com

Поступила в редакцию 15.09.2011 г.

Представлен краткий обзор подходов к математическому описанию распространения бора вверх по течению устья реки. Приведены данные о некоторых устьях рек, где наблюдается бор, и рассматриваются условия его формирования. Существование бора определяется величиной прилива, стоком реки и профилем изменения глубин в эстуарии. Эти же факторы определяют дальность проникновения морских вод в устья рек, степень перемешивания морских и речных вод и особенности движения наносов в устьях рек. Рассмотрены типы циркуляции вод в устьях самых значительных рек, где наблюдается бор, исследовано его влияние на дальность интрузии морских вод в устья. Приведены результаты сравнения влияния выправления русла на условия существования бора и дальность проникновения осолоненных вод в эстуарии рек Сена (Франция) и Цяньтан (Китай).

Ключевые слова: устье, прилив, бор, смешение морских и речных вод, интрузия соленых вод.

DOI: 10.7868/S0321059613010021

Приливный бор — это нагон воды, распространяющейся вверх по течению во время подъема приливного уровня воды, основной причиной которого является большая амплитуда прилива. Величина прилива может быть усилена местными факторами, в частности за счет резонанса, если период колебания уровня воды заливе или эстуарии близок к периоду прилива [20]. В этом случае возможно возникновение приливного бора спустя 2 дня после максимального прилива.

Бор, как правило, формируется во время сизигийного прилива при наибольшем изменении уровня воды. Малые глубины течений в устьях и воронкообразная форма эстуария увеличивают диапазон колебания уровня воды, особенно при низком речном стоке. Вода, поступающая в воронкообразное мелководное устье реки, быстро движется вверх по реке в виде крутой волны со скоростью до ~12 м/с. Фронт волны пересекает всю реку — иногда почти по прямой линии, иногда по кривой, вогнутость которой обращена к верховью реки. При быстром росте уровня воды нарушается непрерывность изменения глубин воды и возникает гидравлический прыжок. Волна

бора формируется после малой воды, причем при движении вверх по реке волны прилива в узких и мелких частях реки передняя часть волны становится очень крутой, часто возвышающейся над уровнем малой воды на 1–2 м. В расширенных и более глубоких частях русла бор может исчезнуть, а выше по течению в более узких и мелких местах — снова появиться. Над более мелкими участками реки над передней частью волны образуется пенный гребень. За первой волной обычно следуют еще несколько волн меньшей высоты. После прохождения бора в одних реках уровень воды поднимается, но не достигает высоты гребня волны бора, в других реках повышение уровня идет непрерывно. При дальнейшем повышении уровня в данном месте бор прекращается незадолго до наступления полной воды. Расстояние, которое проходит волна бора вверх по реке, для разных рек изменяется от нескольких километров до ~70–80 км.

По оценкам разных авторов, во всем мире, исключая Антарктику, насчитывается более 400 эстуариев, подверженных влиянию бора [20, 22, 25]. Формирование бора зависит, в первую очередь, от амплитуды прилива, которая зависит от географического положения устья реки. Оно зависит также от формы устья реки. Боры наблюдаются в

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-05-00061).

Таблица 1. Характеристики устьев рек, в которых наблюдаются приливные боры, расположенные в порядке убывания высоты волны бора h_b ; расход воды Q , соотношение объемов стока пресной W и морской воды P_r , поступающей в эстуарий за время приливного цикла, величина прилива h , скорость изменения ширины эстуария dB/dl (верхнее и нижнее значения параметров – до и после русловыправительных работ, прочерк – отсутствие данных или явления)

Название реки или эстуария, страна	Q , м ³ /с	W/P_r	h , м	h_b , м	dB/dl	F_{r_b}
Цяньган, Китай	1000	$\frac{0.01}{0.022}$	8.9	4.0	$\frac{0.23}{\sim 0.1}$	2.5
Рукав Амазонки, Бразилия	1.72×10^5	–	6	3.5	–	1.03
Рукав Хугли, Индия	$1.4\text{--}3.5 \times 10^3$	0.04	4.9	1–3	0.18	1.01
Северный рук. Янцзы, Китай	366.6	0.01	3.3	~ 1.5	0.16	1.21
Северн, Великобритания	107	0.001	15.0	1.5	0.24	1.04
Жиронда: Гаронна и Дордонь, Франция	$\frac{941}{810}$	0.01	6.0	1.5	0.13	$\frac{1.04}{2.3}$
Мерси, Великобритания	56.0	0.001	8.4	<1	0.29	1.01
Сена*, Франция	430	$\frac{0.024}{0.08}$	7.5	–	$\frac{0.54}{0.38}$	–
Мезень**	780	0.03	7.8	–	0.2	0.5

* На р. Сене бор перестал возникать после выправления русла.

** На р. Мезень бор не наблюдается, несмотря на большую величину прилива.

устьевых областях эстуарного и эстуарно-дельтового типов по классификации устьев рек, предложенной в [9]. Большинство авторов упоминают боры, формирующиеся в устьях крупных рек мира, основные из них – эстуарии рек Сена и Жиронда (Франция), Северн и Мерси (Великобритания), Цяньган (зал. Гуанджоу, Китай), Стикс и Дейли (Австралия), Батанг Лупар (Малайзия), рук. Хугли р. Ганг (Индия), отдельные рукава с эстуарными расширениями р. Амазонки (Бразилия), заливы Кук Инлет (Аляска) и Фанди (США) [37]. В табл. 1 приведены некоторые характеристики перечисленных устьев рек и боров, которые расположены в порядке убывания высоты волны бора.

Исследователи расходятся в оценке величины прилива, при которой начинает формироваться бор; так, в работе [13] указывается минимальная величина 6 м, а в [20] отмечается, что волна бора существует и в устьях с меньшими величинами прилива – 4 м.

В данном исследовании приводятся основные подходы к математическому описанию распространения волны бора в устье реки и рассматриваются условия его формирования. Исследуется роль соотношения расхода воды реки, величины прилива и формы устья в возникновении волны бора, а также влияние этой волны на интрузию морских вод в устье. Приводятся результаты современных исследований распространения вол-

ны бора в устья ряда крупных рек, и рассматривается влияние русловыправительных работ на условия возникновения бора.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЯВЛЕНИЯ

Приливо-отливные колебания поверхности океана, вызывающие изменения отметки уровня в устьевом створе, приводят к неустановившимся течениям в устьях рек. Когда уровень воды в море поднимается во время прилива, приливная волна становится все круче до тех пор, пока не образует резкий фронт – приливный бор. После его формирования в месте фронта возникает резкое увеличение глубины, и поток воды можно описывать с помощью перемещающегося гидравлического прыжка [38].

В гидравлике развит метод описания волнового движения воды (часто возникающего в результате маневрирования гидротехническими затворами плотин, работы гидростанций по разным графикам регулирования, аварийных сбросов воды, колебания стока воды за счет паводков и т.д.), основанный на решении системы двух уравнений движения (уравнение динамического равновесия Сен-Венана) и уравнения неразрывности неустановившегося течения в открытом русле [14, 15]. При волновом движении расход воды Q и площадь поперечного сечения потока A являются функциями времени t и расстояния x (ось x на-

правлена вдоль эстуария). При достаточной величине прилива створ возмущения является источником волны или ряда волн, переносящих значительные массы воды (так называемых волн перемещения), в отличие от ветровых волн, характерными особенностями которых являются колебательное движение частиц воды в вертикальной плоскости относительно первоначального положения и небольшая способность переносить массу воды. При резком увеличении уровня воды в створе возмущения во время прилива возникает обратная положительная волна, которая распространяется вверх по течению реки, вызывая увеличение A выше створа возмущения и уменьшение скорости движения волны U как во времени, так и по длине потока. Резкое снижение отметки уровня воды во время отлива приводит к образованию обратной отрицательной волны, переносящей уменьшение уровня в открытом русле вверх по течению реки. Обратная положительная волна характеризуется крутым передним фронтом, а отрицательная – пологим, все более распластывающимся по мере ее движения. Волновое движение воды в приливных устьях рек, в том числе приливный бор, как правило, является суммой положительной и отрицательной обратных волн [14]. Одна из первых попыток математически описать движение волны бора в р. Сене была сделана Сен-Венаном [20].

Движение волны бора можно представить как квазистационарный гидравлический прыжок, движущийся вверх по течению со скоростью V (рис. 1). Интегральная форма уравнений сохранения массы и момента количества движения дает ряд соотношений для изменения характеристик потока в момент прохождения фронта бора:

$$(U_1 + V)d_1 = (U_2 + V)d_2, \quad (1)$$

$$\frac{1}{2}\rho g(d_2^2 - d_1^2) = \rho(U_1 + V)d_1(\beta_1(U_1 + V) - \beta_2(U_2 + V)), \quad (2)$$

где U – средняя по сечению скорость потока, направленная положительно вниз по течению к устью реки, d – глубина воды, g – ускорение свободного падения, β – коэффициент количества движения Буссинеска. Индексы 1 и 2 относятся к начальным и новым, изменяющимся за счет прохождения бора, условиям потока (рис. 1). При записи уравнений (1) и (2) использовано предположение о справедливости гидростатического распределения давления перед фронтом бора и за ним, потери на трение считаются пренебрежимо малыми, дно реки на коротком участке формирования бора предполагается горизонтальным. Решение уравнений (1) и (2) приводит к зависимости отношения сопряженных глубин (d_1/d_2) от числа Фруда (Fr_b) для приливного бора [15, 20]:

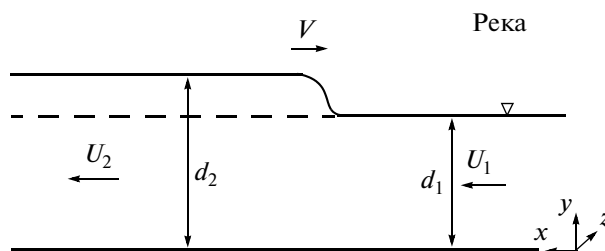


Рис. 1. Схема взаимодействия волны бора с речным течением.

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_b^2} - 1), \quad (3)$$

$$\text{где } Fr_b = \frac{U_1 + V}{\sqrt{gd_1}}. \quad (4)$$

Для бора всегда $Fr_b > 1$, а выражение $(Fr_b - 1)$ – мера величины бора. При $Fr_b < 1$ приливная волна не может стать бором.

Результаты измерений характеристик потока при прохождении бора в природном эстуарии и в лабораторных лотках подтверждают внезапные изменения полей скорости и давления, характерные для гидравлического прыжка [20]. Экспериментальное исследование d_2/d_1 при моделировании бора в лотке показало, что это отношение в общем удовлетворяет уравнениям неразрывности и количества движения [38]. Однако в диапазоне $1.1 < Fr_b < 2$ результаты измерений отношения d_2/d_1 занижены по сравнению с (3), что объясняется вовлечением воздуха в гребень волны обрушающегося бора.

Различают два вида приливных боров: волнистый и обрушающийся, причем волнистый приливный бор наблюдается при $1 < Fr_b < 1.8$, при $Fr_b > 1.8$ бор становится обрушающимся. На практике большая часть боров имеет волнистую форму: первая волна сопровождается цепочкой хорошо развитых волнистых образований с меньшей амплитудой. Колебания свободной поверхности волнистого бора можно описать математически с помощью известных уравнений трансформации волн на мелкой воде, в результате решения которых получается синусоидальная форма поверхности волны бора. Хорошие результаты дает использование уравнения Кортевега-де-Фриза, решением которого является кноидальная волновая функция [20]. Наблюдается хорошее согласие данных измерений и математических моделей, хотя ни линейная волновая теория, ни кноидальная волновая функция не описывают асимметричную форму волны бора и детали профиля свободной поверхности воды [20, 25].

*Турбулентная структура течения
в эстуарии при наличии бора*

Наблюдения за приливными борами в природе свидетельствуют о сильном турбулентном перемешивании, вызываемом ими в эстуарной зоне, влияние которого может быть заметно на значительных расстояниях [20]. В речном устье при возникновении бора наблюдается обратное течение, продольные скорости U_x быстро уменьшаются на всех горизонтах, а пульсации всех трех компонент скорости ниже бора растут. При моделировании потока в лотке прохождение волны обрушающегося бора вызывает увеличение турбулентных напряжений примерно в 30 раз ($Fr_b \geq 1.8$) по сравнению с режимом бора без обрушения [20]. В этом случае напряжения Рейнольдса на 1–2 порядка превышают порог напряжений, вызывающих движение донных и взвешенных наносов в речном потоке. Таким образом, приливный бор сопровождается сильной турбулизацией потока, что вызывает интенсивное перемешивание воды в русловом потоке, которое не описывается классическими теориями смешения.

Образование больших турбулентных вихрей ниже фронта бора, которые переносятся вверх по течению за бором, также обнаружено с помощью современных методов численного моделирования [27]. Эти вихри остаются вблизи дна по мере движения бора вверх по течению и могут переносить вверх наносы и осолоненные воды. Результаты физического и численного моделирования показывают наличие больших колебаний поперечных и вертикальных компонент скорости, свидетельствующих о перемежающихся течениях за фронтом бора. Свидетельства об очагах турбулентности получены для волнистых и обрушающихся боров, причем скорость производства завихренности пропорциональна величине $(Fr_b - 1)^3$ [33]. Облака завихренности за бором связаны со вторичными течениями, эти облака увеличиваются за счет непризматической формы русла со сложной батиметрией. Перенос больших турбулентных образований за фронтом бора наблюдался в эстуарии р. Дейли (Северная Австралия) в виде вращающихся по часовой стрелке и против часовой стрелки вихрей через ~20 мин после прохождения бора [49].

Обнаружено принципиальное различие в турбулентной структуре потоков при прохождении волнистого ($Fr_b < 1.8$) и слабого обрушающегося ($1.8 < Fr_b < 2.1$) бора [38], заключающееся в различии полей давления и скорости за фронтом бора. При прохождении волнистого бора большие значения составляющих напряжений Рейнольдса возникают в придонной области потока вплоть до

дна сразу после прохождения гребня волны перед следующим гребнем. При слабом обрушающемся боре большие значения турбулентных напряжений наблюдались в зоне сдвига, при высоких градиентах скорости, в то время как у дна наблюдалось обратное вихревое течение.

Коэффициенты турбулентной диффузии

Коэффициенты турбулентной диффузии в течении при прохождении приливного бора можно определить в лагранжевом представлении с помощью визуализации потока и измерения среднего квадрата смещения частиц σ_x и σ_y в продольном и вертикальном направлениях соответственно. В приближении однородной турбулентности [44] коэффициенты продольной (D_x) и вертикальной (D_y) диффузии равны

$$D_x = \frac{\sigma_x^2}{2t'}, \quad D_y = \frac{\sigma_y^2}{2t'}, \quad (5)$$

где t' — масштаб времени, в момент $t' = 0$ частица проходит под передним краем фронта бора.

В [21] при моделировании распространения волны перемещения в лотке регистрировались траектории легких шарообразных частиц с диаметром 3.72 ± 0.2 мм и относительной плотностью 1.037 ± 0.012 . Полученные безразмерные коэффициенты для волнистого и обрушающегося бора равны соответственно: $D_x/U_1 d_1 = 0.1$, $D_y/U_1 d_1 = 0.018$; $D_x/U_1 d_1 = 0.12$, $D_y/U_1 d_1 = 0.011$ при скорости потока перед волнистым бором $U_1 = 0.335$ м/с, а перед обрушающимся бором $U_1 = 0.515$ м/с. Коэффициенты продольной диффузии на порядок превосходят коэффициенты вертикальной диффузии, причем коэффициент вертикальной диффузии для волнистого бора больше, чем для обрушающегося, что объясняется длительным влиянием колебаний свободной поверхности.

Для сравнения значений $D_y/U_1 d_1$ в волне бора с осредненным по глубине коэффициентом вертикальной диффузии в речном потоке $\overline{K_y}$ воспользуемся выражениями из [44]:

$$\overline{K_y} = 0.067u_* H$$

или из [2]:

$$\overline{K_y} = 0.066\kappa n \langle u \rangle H, \quad (6)$$

где u_* — динамическая скорость потока; κ — постоянная Кармана; n — показатель степени в степенном законе распределения скорости; $\langle u \rangle$, H — осредненные по вертикали скорость и глубина речного потока соответственно. В диапазоне из-

менения значений n , характерных для равнинных рек ($n = 0.1-0.3$), значения нормированного коэффициента вертикальной диффузии изменяются в диапазоне $\overline{K}_y / \langle u \rangle H$, составляющем 0.0026–0.008, что в среднем на порядок меньше, чем в потоке при прохождении волны бора. Такое увеличение коэффициентов турбулентной диффузии при прохождении бора в потоке способствует полному перемешиванию потока в створе образования волны бора.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ МОРСКИХ ВОД В УСТЬЯ РЕК И ФОРМИРОВАНИЕ БОРА

Оценка типа перемешивания и стратификации вод в устьях рек по W/P_t

Дальность проникновения морских вод и законы их перемешивания с речными водами в устьях рек определяются, как и существование бора, соотношением между величиной прилива и стоком реки и скоростью изменения ширины и глубины эстуария. Проникновение морской воды в речные устья характерно для эстуариев рек Сена, Жиронда, Мерси, Северн, Мезень и устьев эстуарно-дельтового типа по классификации В.Н. Михайлова [8] (рук. Хугли р. Ганг, Северный рук. р. Янцзы). В дельтах рек, имеющих малый уклон дна в сторону моря, интрузия морских вод в рукава слабо выражена.

Интрузия осолоненных вод в устье реки зависит от типа перемешивания морских и речных вод, который определяется величиной отношения объемов стока пресной воды (W) и морской воды (P_t), поступающей в эстуарий во время прилива [3, 6, 32, 46]. При $W/P_t > 1$ наблюдается “клин соленых вод”, при $0.1 < W/P_t < 1.0$ и $0.005 < W/P_t < 0.1$ эстуарий превращается в частично перемешанный с сильной и слабой стратификацией, и при $W/P_t < 0.005$ – в полностью перемешанный эстуарий. Все устьевые области, для которых удалось оценить W/P_t (табл. 1), относятся к частично перемешанным эстуариям со слабой стратификацией (р. Цяньтан, Северный рук. р. Янцзы, рук. Хугли, Мезень, Сена, Жиронда) и к полностью перемешанным (Северн, Мерси). Особенности расчета параметра W/P_t для разных устьев и его изменения в результате русловыправительных работ описаны ниже.

Положение границы бора и проникновение морских вод в устья некоторых рек

Подробное описание дельты **р. Амазонки**, стока реки и гидрологических процессов в ней приводится в [7]. Оценка W/P_t для рукавов дельты

р. Амазонки затруднительна, так как не достаточно данных о расходах воды в отдельных рукавах и об их площадях. Из наблюдений известно, что в эстуарных расширениях рукавов Амазонки наблюдается бор поророка, формирующийся на расстоянии 10–20 км выше устьевого створа и распространяющийся на большие расстояния вверх по течению. Высота бора достигает 4 м. Благодаря большому расходу воды в реке, достигающему, по уточненным данным, $1.7 \times 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$ [7], и особенностям геологического строения устьевого взморья [28] осолоненные воды не проникают в дельту реки. При этом “солёный клин” формируется в придонном слое океана на морском шельфе Амазонки [45]. Форма вертикальных распределений солёности изменяется в зависимости от стока реки, но в самый засушливый сезон при минимальном расходе “солёный клин” не достигает устьевого створа Северного рук. Приливные колебания уровня воды в межень распространяются на ~900 км вверх по течению реки [7]. Таким образом, влияние бора не сказывается на переносе осолоненных вод внутрь рукавов дельты, но играет большую роль в переносе наносов и, по-видимому, является одной из основных причин отсутствия выдвигания дельты реки [34].

В устьях рек, для которых $W/P_t = 0.005-0.1$, объем приливной призмы достаточно велик относительно речного стока и приливное течение становится турбулентным и нижний и верхний слои обмениваются массой и солью в обоих направлениях. В слабо стратифицированном эстуарии солёность воды верхнего и нижнего слоев по направлению к морю постепенно растёт. На вертикальных профилях солёности наблюдается постепенный рост солёности от поверхности к дну с максимальным градиентом в области границы слоев.

В устье **р. Цяньтан**, впадающей в зал. Ханчжоувань Восточно-Китайского моря, образуется бор “Серебряный Дракон” с высотой волны до ~4 м [41] – самой большой в мире. Средняя величина приливов у восточного побережья Китая (рис. 2) составляет 3.3 м [29]. Вблизи устьев рек Янцзы и Цяньтан величина прилива увеличивается за счет сужения заливов и в зал. Ханчжоувань у г. Ганьпу достигает 9 м – максимальной величины на побережье Китая [41] (рис. 3а). Речной сток мал, за исключением периодов высоких паводков, средне-многолетний расход воды в створе Ханчжоу – $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$ (табл. 1). Величина объема приливной призмы очень велика (~ $5.3 \times 10^9 \text{ м}^3$) и сравнима с приливной призмой устья р. Янцзы [23], а



Рис. 2. Устья рек Янцзы (1) с Северным (2) и Южным (3) рукавами и Цяньган (4); стрелки – направления течений в Северном рук. дельты Янцзы.

отношение W/P_r мало (0.01 [31]), что приводит к периодическому появлению слабой стратификации обычно перемешанных по вертикали масс воды эстуария. В 1960–1990-х гг. в этом эстуарии проводились глобальные русловыправительные работы с целью уменьшить площадь поверхности, заливаемой приливами, и его гидрологический режим сильно изменился.

Следующий по величине бора эстуарий – **рук. Хугли**, входящий в устьевую область Ганга и Брахмапутры. Гидрологический режим этой области подробно описан в [10]. Эстуарий рук. Хугли длиной ~80 км простирается от устьевого створа на уровне юго-западной оконечности о. Сагор (ширина 28 км) до г. Даймонд Харбор (рис. 4а). Муссонный климат этой области определяет неравномерное распределение стока воды в рук. Хугли в течение года. Расход воды (Q) в рукаве в период муссонов (июнь–сентябрь) в среднем составляет 1400–2300 м³/с, а максимальный – 2500–3500 м³/с [5]. По новым данным, приведенным в [40], средние за 1998–2001 гг. расходы воды,

поступающей в рукав от регулирующей сток плотины Фаракки (введена в строй в 1976 г.), составляют: в засушливый период, с февраля по май, – 1000 ± 81.6 , во время муссонов – 2975 ± 1144 , а с октября по январь – 1875 ± 985.5 м³/с. Среднегодовой Q рукава после строительства плотины составляет 1950 м³/с. Если использовать для оценки соотношения W/P_r минимальный Q в засушливый период, то $W/P_r = 0.03$, если средний $Q = 1950$ м³/с, то $W/P_r = 0.06$, т.е. течение в эстуарии вертикально перемешано со слабой стратификацией.

Величина прилива вдоль шельфа колеблется от 5.6 м на востоке до 3.8 м на западе [10]. Величина сизигийного прилива в устье рук. Хугли достигает 4.9 м. Приливные колебания уровня воды распространяются на расстояние 300 км вверх по течению рукава. На участке выше г. Даймонд Харбор глубины уменьшаются до 4 м, высота приливной волны постепенно растет и между городами Хугли-Пойнт и Брул (37 км ниже Калькутты) волна становится все более крутой, образуя приливный бор высотой ~1.5 м на больших глубинах и до ~3.5 м над отмелями [24]. До 1940-х гг. бор появлялся во время равноденственных сизигийных приливов, а в 1960-е гг. стал появляться в течение каждого сизигийного прилива. Основной причиной увеличения частоты появления бора является постепенное уменьшение стока воды из Ганга. Некоторое влияние на увеличение частоты появления бора оказало заиление верхних участков приливного рукава [5]. Наибольшие величины приливов наблюдаются с февраля по май и с июля по сентябрь. Скорость приливных течений на участке от устьевого створа (юго-западная оконечность о. Сагор) до створа Даймонд Харбор изменяется от 0.5 до 2.0 (в среднем 1.2) м/с, скорость отливных течений – от 0.2 до 1.4 м/с [40].

Повышение солёности воды в эстуарии наблюдается при наименьших расходах воды перед муссоном, максимальные величины солёности зафиксированы в мае. Уменьшение солёности воды, вызванное повышением расходов речной воды, наблюдается в период муссонов с минимумом в паводок в сентябре (рис. 4б) [40]. Вертикальные градиенты солёности невелики и изменяются в диапазонах: в засушливый период 0.3–2.1, во время муссона 1.2–3.1, а с октября по январь 0.5–2.2‰. Таким образом, устье рук. Хугли представляет собой хорошо перемешанный эстуарий со слабой стратификацией вод, что подтверждает тип стратификации вод, определенный по параметру W/P_r .

До строительства плотины Фаракка осолоненные воды с $S \cong 10\text{‰}$ в мае доходили до г. Гарден

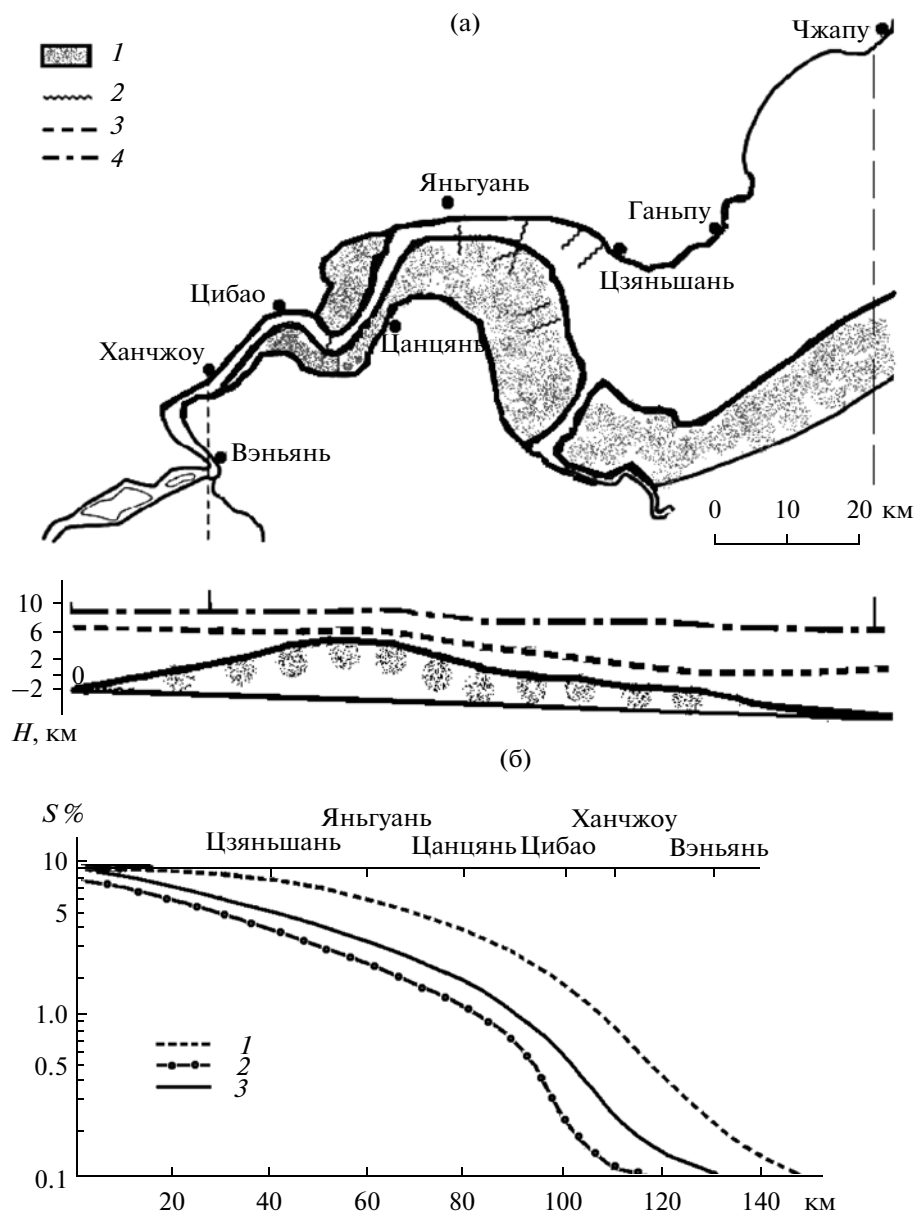


Рис. 3. Схема эстуария р. Цяньтан до и после русловыправительных работ (а): 1 – осушенные площади, 2 – положение сечений, в которых образуются волны бора; на врезке показан песчаный бар и средние отливный (3) и приливный (4) уровни воды. Изменение распределения средней солености воды вдоль эстуария р. Цяньтан (б): 1 – до выправления русла, 2 – после ввода в строй водохранилища в верховьях реки, 3 – после выправления русла и начала работы водохранилища. Расстояние отсчитывается от морского створа эстуария г. Ганьпу.

Рич (рис. 4б), и волны бора, образующиеся ниже по течению реки с февраля по май, способствовали переносу осолоненных вод до Калькутты и выше. В настоящее время осолоненные воды не проникают в устье рук. Хугли выше г. Даймонд Харбор (рис. 4б), что обеспечивается регулированием стока плотиной Фаракка [40]. Бор, формирующийся выше г. Брул, никак не влияет на перенос осолоненных вод вверх по течению, так как он формируется выше границы интрузии осолоненных вод аналогично бору в устье Амазонки.

Дельта р. Янцзы в вершине делится на Северный и Южный рукава и по своему строению схожа с дельтой Амазонки [11] (рис. 2). Южный рукав при подходе к морю делится многократно, а Северный – представляет собой воронкообразный эстуарий. Бор в Северном рукаве эстуария р. Янцзы происходит с 1940-х гг. по настоящее время. Частота возникновения и высота бора в Северном рукаве меньше, чем в эстуарии р. Цяньтан. Сужение Северного рукава привело к существенной деформации приливных волн и увеличению высоты бо-

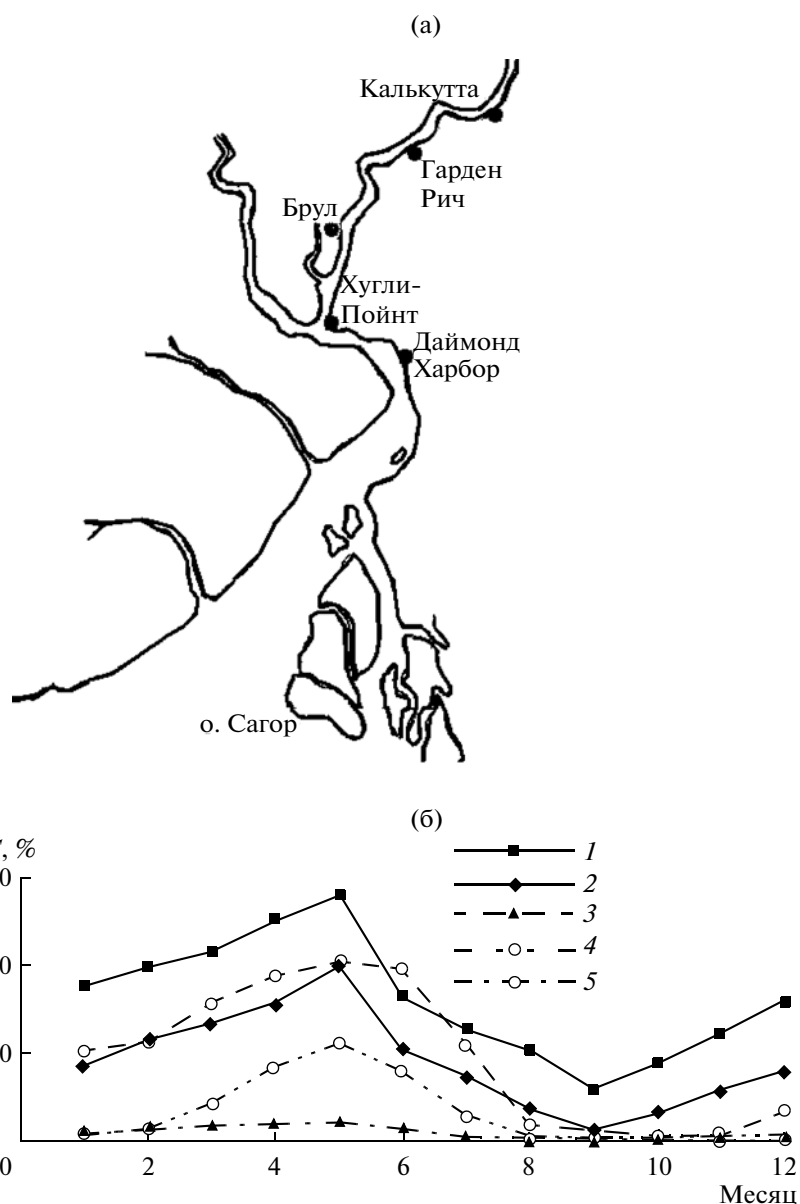


Рис. 4. План эстуария рук. Хугли (а) и распределение в нем среднемесячных соленостей воды за 1998–2001 гг. (б) в створах: юго-западная оконечность о. Сагор (1), северная оконечность о. Сагор (2) и г. Даймонд Харбор (3) после строительства плотины Фаракка [40], Даймонд Харбор (4) и Гарден Рич (5) за 1958–1959 гг. до строительства плотины [24].

ра в последние годы. Общий ход течений в устье показан на рис. 2 [26].

Северный рук. представляет собой эстуарий длиной 80 км и глубиной преимущественно 2–4 м (рис. 5а). Ширина эстуария в устьевом створе составляет 16, а в месте соединения рукавов ~3 км. Средняя и максимальная величины полусуточных приливов составляют 3.04 и 5.95 м соответственно. Эволюция эстуария определяется его формой, гидродинамическими условиями, переносом наносов и особенно — изменениями расхода воды

р. Янцзы. Расход воды реки постоянно уменьшается с начала XX в., что привело к превращению Северного рук. из потока, в котором преобладает влияние отлива, в поток с преобладающим приливом. Ширина Северного рук. продолжает сужаться по мере уменьшения расхода воды. По уточненным данным, среднемноголетний расход воды р. Янцзы составляет 2.82×10^4 м³/с [11], доля Северного рук. составляет всего 1.3% (367 м³/с). После того, как с начала XVIII в. основное течение стало идти через Южный рук., расход воды в

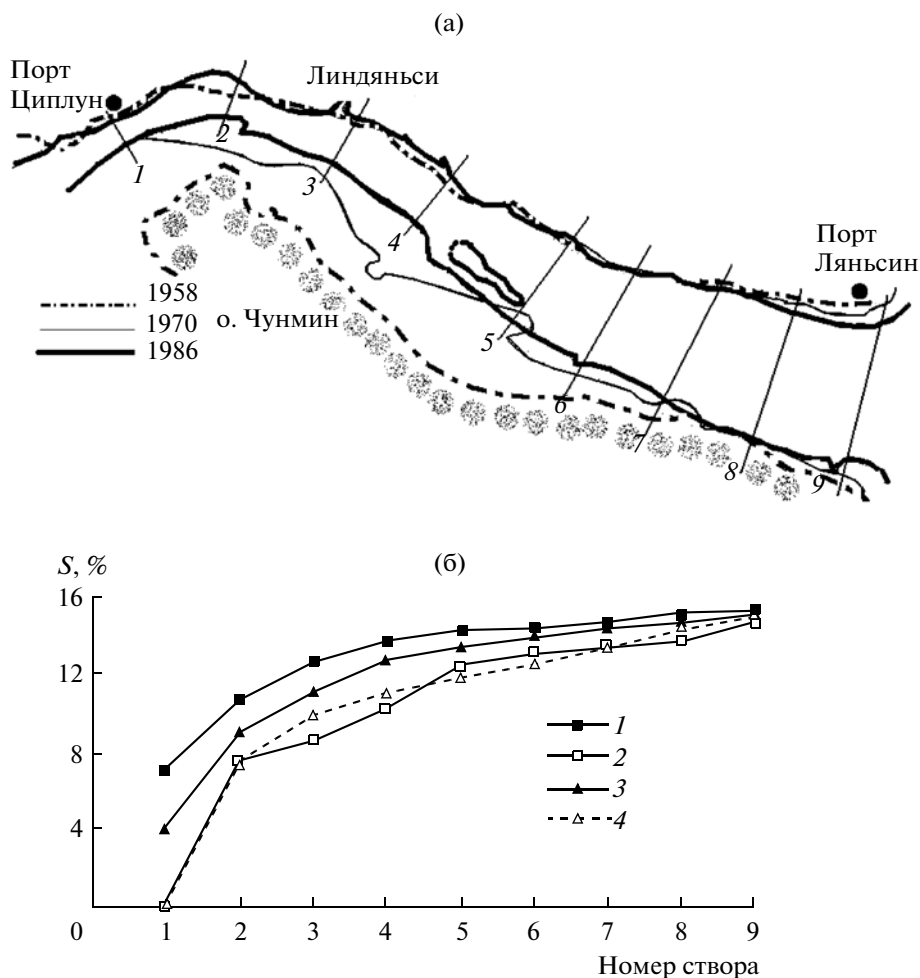


Рис. 5. Эволюция берегов Северного рука р. Янцзы и положение сечений, в которых измерялись скорости и солёности воды, (а); распределение средней по сечению солёности воды вдоль Северного рука во время максимальных и минимальных сизигийных (1, 2) и квадратурных (3, 4) приливов (б).

Северном рука существенно уменьшился и рукав сузился, особенно в верхнем течении (рис. 5а). Участки в верхнем течении заилились и стали более мелкими, устьевые участки увеличились. Так, площадь поперечного сечения у в устьевом створе у г. Ляньюньсин-Порт увеличилась с 36900 м² в 1991 г. до 38200 м² в 1998 г. [22].

В Северном рука формируется приливный бор трех типов: 1 – с низким, не обрушающимся гребнем, высота которого изменяется в пределах 10–30 см; 2 – линейный, с разрушающимся гребнем высотой более 30 см; 3 – возвратный, образующийся при сильном боре, достигающем верхней границы Северного рука и отражающемся от течения в Южном рука. В порту Цинлун возвратный бор наблюдается обычно спустя 1–1.5 ч после прохождения прямого линейного бора. Высота возвратного бора может быть не меньше, чем высота прямого бора, и даже превышать ее [22].

Сечение, в котором формируется бор при распространении приливной волны в эстуарий, называемое границей бора, определяется условием $Fr_b > 1$. Граница бора смещается в зависимости от фазы прилива: вниз по реке – при максимально большой величине прилива, вверх – при сравнительно меньшем приливе. Для минимального ($h_b = 0.3$ м) и максимального ($h_b = 1.6$ м) боров, наблюдавшихся в порту Цинлун, в створе Ляньюньсин, отличающемся малыми глубинами (~1.5 м), $Fr_b > 1$ (1.21 и 1.29 соответственно [22] (рис. 5а)). Ниже по течению рукава $Fr_b < 1$; а вверх до порта Цинлун $Fr_b > 1$. Таким образом, створ у Ляньюньсин можно считать границей образования бора, который переносит вверх по течению однородные по солёности массы воды из этой области.

При подъеме уровня воды на приливе морская вода проникает в устье через Северный и Южный рукава, причем в Северном рука она достигает за-

падной оконечности о. Чунмин, где встречается с потоком Южного рук. Обратное течение в Южном рук. останавливается на уровне середины о. Чунмин благодаря большому расходу речной воды. При отливе морская вода, проникающая в Южный рук. через Северный рук., смешивается с водой Южного рук. и движется в сторону моря.

Соленость воды в Северном рук. изменяется в диапазоне 5–14‰ — она существенно больше, чем в Южном рук. (0–3‰). В межень результирующий поток воды отрицателен, т.е. направлен в сторону реки, причем осолоненная вода поступает в устье в основном через Северный рук. На рис. 5б показаны распределения средней в сечении солености воды вдоль Северного рук. при сизигийных и квадратурных приливах. Соленость воды в одних и тех же сечениях в сизигию больше, чем в квадратуру. Выше створа 3 наблюдается устойчивое снижение солености воды при всех величинах прилива, свидетельствующее о хорошем перемешивании и разбавлении воды на этом участке. За счет реализации проекта сужения Северного рук. и строительства шлюза [26] соленость его вод при встрече с водами Южного рук. близка к нулю при всех величинах прилива. Таким образом, при растущем приливе осолоненная вода не проникает в Южный рук., а на убывающей воде изогалина 0.25‰ (стандарт 0.25‰, принятый в Китае) выдвигается из Южного рук. в открытое море, что существенно, так как в нем находится водозабор г. Шанхая.

Эстуарий Жиронда является частью устьевой области рек Гаронна и Дордонь [12], поэтому в табл. 1 приведено суммарное значение Q для этих рек. Объем приливной призмы, рассчитанный по скорости прилива и использованный для расчета W/P_t (табл. 1), согласуется со значением $P_t = 2 \times 10^9 \text{ м}^3$, полученным в статье [12]. Измерения показывают, что в поверхностном слое воды существует остаточное течение в сторону моря, а в придонном слое — в сторону суши, что подтверждает тип эстуарной циркуляции, определяемый по параметру W/P_t , приведенному в табл. 1.

По данным [12], верхняя граница эстуария, т.е. граница проникновения осолоненных вод в эстуарий, находится вблизи слияния рек Гаронна и Дордонь. В Гаронне выше г. Бордо на мелководье образуется бор с высоким быстро обрушающимся гребнем, а на р. Дордонь у г. Сен-Пардон (в 30 км выше от вершины эстуария Жиронды) формируется волнистый бор, цепочка волн которого распространяется на 30 км выше по течению [35]. Таким образом, бор формируется на устьевых участках рек Гаронна и Дордонь существенно выше по

течению верхней границы эстуария и границы проникновения морских вод в эстуарий и на их перенос не влияет, однако вносит существенный вклад в перенос наносов вдоль этих участков.

В полностью перемешанном эстуарии при $W/P_t < 0.005$ турбулентное перемешивание становится настолько интенсивным, что исчезают локальные разности солености. Соленость растет по мере приближения к морю, но остается постоянной по глубине, понятия верхнего и нижнего слоев отсутствуют. Очень слабое по сравнению с сильным приливным течением среднее течение направлено в сторону моря на всех глубинах, и проникновение соли в эстуарий происходит исключительно за счет турбулентной диффузии в осредненном течении.

Эстуарий р. Мерси, по [18], имеет длину 46 м от устьевого створа в г. Нью Брайтон до границы распространения приливов в г. Уоррингтон. Выше Нью Брайтона начинается участок под названием Узости (ширина 1–1.8 км, глубина ~20 м), который тянется мимо г. Ливерпуля на 10 км вверх по течению до района Дингл (рис. 6а). Весь этот участок называется нижним эстуарием, а от Дингл до г. Уоррингтон — верхним. Основной расход воды проходит через Манчестерский судоходный канал [18] и попадает в верхний эстуарий в районе г. Истхем.

Во время измерений скорости и солености в июне–июле средний расход воды в 2 км выше Нью-Брайтон (нижний эстуарий) составлял $80 \text{ м}^3/\text{с}$ [18]. Осредненная по глубине скорость приливного течения равна 0.9 м/с при квадратурном приливе и 1.3 м/с — при сизигийном. Структура течений в эстуарии различна во время прилива и отлива. Измерения солености воды в нижнем эстуарии показали, что во время квадратурного прилива в течение длительного времени соленость однородна по глубине, а в период сизигийного прилива разность между соленостями воды в поверхностном и придонном слоях никогда не опускается ниже 0.5‰. Абсолютные величины солености изменяются от 25‰ на поверхности до 31‰ у дна. Течение в нижнем эстуарии является переходным от сильно стратифицированного к умеренно стратифицированному [18]. Обнаружено заметное увеличение обратного плотностного потока в нижнем эстуарии с ростом амплитуды прилива при постоянном речном расходе. Авторы [42] также считают течение в эстуарии частично перемешанным. В то же время в [39] при рассмотрении течения во всем эстуарии отмечается отсутствие вертикального градиента солености и полное перемешивание потока во время отлива за счет рез-

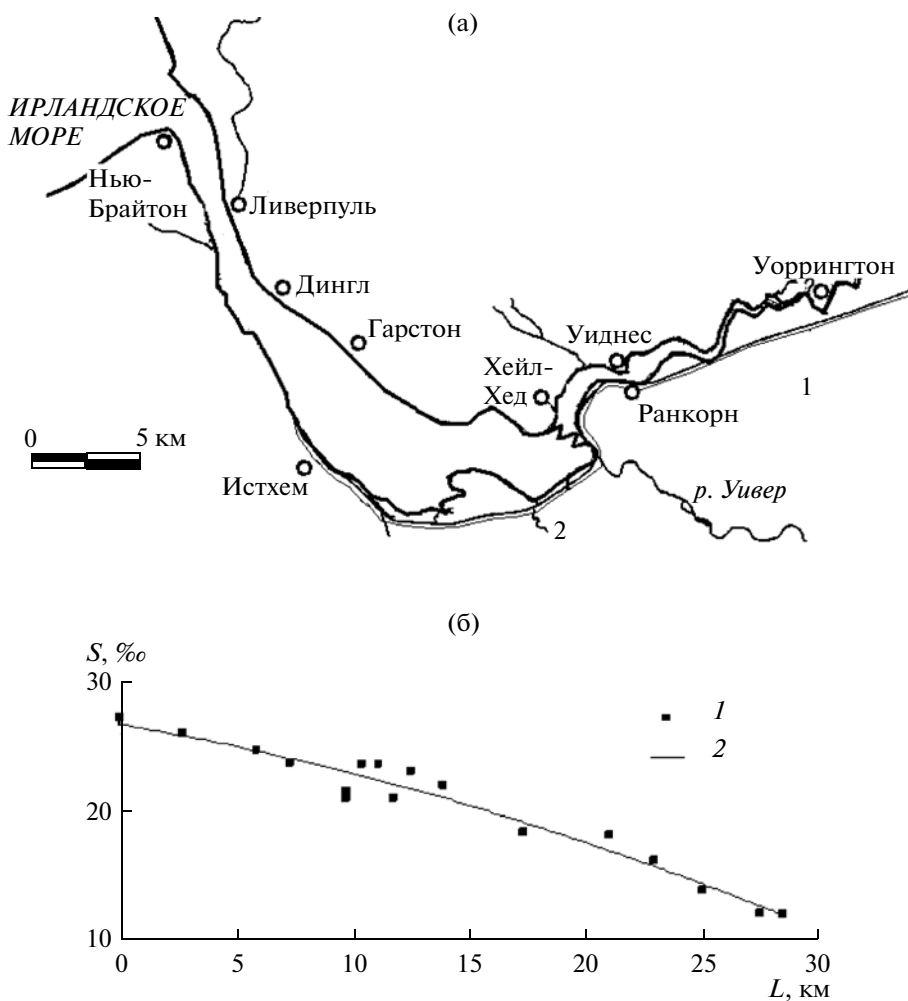


Рис. 6. Карта-схема эстуария р. Мерси (а): 1 – Манчестерский судоходный канал, 2 – положение створа формирования бора; распределение солёности воды на стрежне потока вдоль эстуария (б) [18]: 1 – измерения, 2 – экстраполяция данных.

кого его сужения у г. Ливерпуля и больших скоростей течения. Отношение $W/P_t \sim 0.001$, рассчитанное по средним характеристикам эстуария, также свидетельствует о полном перемешивании вод. По-видимому, структура течений в нижнем и верхнем эстуарии р. Мерси разная, и его стоит делить, несмотря на небольшие масштабы, на нижний и верхний эстуарий аналогично эстуарию р. Св. Лаврентия [3].

Величина квадратного прилива на входе в эстуарий составляет 4 м, а сизигийного – доходит до 10 м. Бор образуется в эстуарии при величине прилива ~ 10 м, наблюдаемой в периоды, близкие к весеннему и осеннему равноденствию. Однако бор может образоваться и при меньшей величине прилива в условиях уменьшения расхода речной воды в межень. Бор наблюдается в верхнем эстуарии р. Мерси у плотины Хейл (~ 30 км от устьевого

створа) примерно за 2 ч 25 мин до наступления высокой воды в Ливерпуле. Из парка на правом берегу можно наблюдать, как он проходит под железнодорожным и автомобильным мостами г. Ранкорна за ~ 1 ч 50 мин до высокой воды в Ливерпуле. При благоприятных условиях бор достигает Уоррингтона, проходя под железнодорожным мостом за 20 мин до полной воды в Ливерпуле, быстро минует центр города и достигает плотины выше города непосредственно перед высокой водой в Ливерпуле. Солёность воды на глубине 0.6 м от поверхности (рис. 6б) в месте образования бора у плотины Хейл составляет 12‰ [18], т.е. бор способствует переносу выше по течению воды такой солёности, которая при малом расходе воды в реке может сохраняться довольно долго.

Коэффициенты турбулентной диффузии, рассчитанные по результатам измерений в Узостях нижнего эстуария р. Мерси, следующие: про-



Рис. 7. План эстуария р. Северн.

дольный $D_x = 1.2-4.7 \times 10^2 \text{ м}^2/\text{с}$ [19] и вертикальный $D_y = 12-37 \text{ см}^2/\text{с}$ [18].

Эстуарий р. Северн имеет классическую воронкообразную форму, по типу перемешивания речных и морских вод похож на эстуарий р. Мерси, поэтому их часто сравнивают в научной литературе [43]. В Бристольском зал. и устьевом створе у м. Майнхед эстуария Северн (рис. 7) величина прилива достигает 15 м (вторая после самой большой в зал. Фанди (США) – 18 м). Вершиной эстуария в литературе считается г. Глостер [47]. Воронкообразная форма эстуария, высокие приливы и подстилающая поверхность, сложенная скальными породами, галькой и песком, способствуют образованию потока с большой мутностью, придающей воде в эстуарии коричневатый оттенок. Колебания уровня воды во время высокого сизигийного прилива достигают плотины в г. Глостер. Во время сизигийных приливов у г. Шарпнесс-Докс формируется бор со средней высотой 1.5 м, максимальная высота волны наблюдалась 15 октября 1966 г. – 2.8 м. Волна движется вверх по течению реки с большой скоростью (5–8 м/с), и еще заметна в 4 км ниже г. Глостер.

Авторы работ, посвященных измерениям солености воды в эстуарии р. Северн, отмечают отсутствие вертикального градиента солености в водах эстуария [16, 43, 47], что подтверждается и величиной параметра $W/P_t = 0.001$. Верхняя граница распространения осолоненных вод во время сизигийного прилива расположена между городами

Эпни и Глостер, а в квадратурный прилив – не выше г. Арлингем [16]. Зимой речные паводки сдвигают границу осолоненных вод в сторону моря. Соленость воды в эстуарии подвержена большим приливным и сезонным колебаниям. Есть участки более и менее стабильные по солености воды. Летом зона стабильной солености доходит до г. Ост, а зона больших колебаний солености расположена выше Шарпнесс-Докс. Максимальная скорость изменения солености в Эпни в период летних сизигийных приливов достигает $15\text{‰}/\text{ч}$ [17]. Наибольшие колебания солености, вызванные в том числе переносом осолоненных вод волнами бора, возникают в г. Арлингем, где летом за приливный цикл они достигают максимальной величины – 15‰ при максимальной скорости изменения – $15\text{‰}/\text{ч}$, а в течение недели соленость воды может измениться от 0 до 25‰ . Наиболее стабильные условия по солености воды наблюдаются в Осте в летний период, а в створе г. Арлингем наиболее стабильны низкие солености на полной воде зимой. В Осте летом вода имеет постоянную соленость $\sim 25\text{‰}$ с колебаниями в пределах 2‰ в зависимости от фазы прилива. Зимой средняя соленость воды в сизигийный прилив составляет $\sim 14\text{‰}$ с колебаниями в пределах 2‰ в зависимости от фазы прилива. При квадратурном приливе колебания солености за приливный цикл достигают 10‰ , а средняя соленость может упасть до нуля. Зимой зона стабильной солености доходит вверх по течению до г. Уэстон, а зона сильных колебаний солености воды сдвигается до г. Ост. Минимальная скорость изменения

солености наблюдается в г. Ост в период зимних квадратурных приливов и не превышает 2‰/ч. Бор, образующийся в створе у г. Шарпнесс-Доке, играет большую роль в создании зоны резких колебаний солености у г. Арлинггема.

Коэффициент продольной дисперсии в эстуарии р. Северн увеличивается при движении вверх по течению реки от $\sim 10^2$ м²/с вблизи устьевого створа до $\sim 10^3$ м²/с в вершине эстуария [48]. Коэффициент вертикальной турбулентной диффузии, измеренный вблизи устьевого створа и осредненный за несколько приливных циклов, составляет ~ 100 см²/с [47]. Таким образом, D_y в эстуарии р. Северн превосходит D_y в эстуарии р. Мерси в несколько раз, т.е. в эстуарии р. Северн – более интенсивное вертикальное перемешивание вод, несмотря на одинаковые значения параметра W/P_i , рассчитанного по средним характеристикам эстуариев.

ВЛИЯНИЕ РУСЛОВЫПРАВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА ИНТРУЗИЮ МОРСКИХ ВОД И ОБРАЗОВАНИЕ БОРА В НЕКОТОРЫХ УСТЬЯХ

р. Цяньтан

При впадении в зал. Ханчжоувань р. Цяньтан образует широкий и мелкий эстуарий. Ширина залива по морскому краю – 100 км, по направлению к устью реки он сужается воронкообразно, ширина морского створа эстуария у г. Ганьпу составляет 20 км. Как было отмечено выше, величина приливов у г. Ганьпу достигает максимальной величины на побережье (9 м) [41]. Ширина потока B в вершине эстуария у г. Ханчжоу составляет ~ 1.2 км [31]. Глубина H изменяется в диапазоне 1–6 м при отливе до 10 м при высокой воде. Отношение ширины к глубине $\sqrt{B}/H > 10$ –45, что превышает такое отношение для р. Желтой, типичной “блуждающей” реки в Китае.

Длина устьевой области р. Цяньтан от морского створа эстуария до границы проникновения приливов внутрь эстуария составляет 282 км [31]. Вся устьевая область р. Цяньтан делится на 3 участка (рис. 4а): верхний, находящийся под влиянием реки, – простирается вверх по течению от г. Вэньнянь на 78 км до границы проникновения приливных колебаний уровня воды; средний, собственно эстуарий, – от г. Вэньнянь до г. Ганьпу, его длина составляет 122 км; нижний (устьевое взморье), находящийся под влиянием приливов, – участок зал. Ханчжоувань между городами Ганьпу и Луцаоган, длиной 82 км. Верхний и нижний участки относительно стабильны, а в эстуарии ре-

ки наблюдаются грандиозные приливные течения с высоким приливным бором, образующимся в нескольких створах выше г. Цзяньшань (рис. 4а). Донные наносы на этом участке представляют собой хорошо сортированные, однородные, легко размываемые илы с диаметром частиц 0.02–0.04 мм, способствующие сильным намывам и размывам русла. Местоположение основного русла постоянно меняется и, соответственно, меняется площадь низин, заливаемых водами прилива. С севера и юга эстуарий окружен плодородными долинами, уровень поверхности которых находится ниже уровня прилива на 2–4 м, и они защищены дамбами от приливных волн.

Среднее значение Q – 1000 м³/с (табл. 1) мало по сравнению с величиной приливной призмы. Это приводит к тому, что большое количество наносов, которое приносится приливным течением, не может быть унесено более слабым, но длительным отливным течением. Процесс накопления наносов вызывает формирование длинного внутреннего бара (рис. 4а), который является причиной образования очень широкого и мелкогустого устья, сильного приливного бора, частых изменений положения основного русла и нестабильных приливных осушек.

Для стабилизации блуждающего русла, эксплуатации низин, заливаемых приливами, и улучшения условий навигации в течение последних 50 лет были предприняты работы по выправлению русла с целью повышения отношения W/P_i за счет уменьшения объема приливной призмы на участке реки от Ханчжоу до Ганьпу [31]. Для оценки эффективности предлагаемых работ использовались численные модели $1D$ и $2D$ движения потока в эстуарии, переноса соли и наносов и распространения волны бора [31]. В результате русловыправительных работ в эстуарии р. Цяньтан ширина русла была уменьшена в разных сечениях в 2–4 раза (табл. 2; рис. 4а) и общая площадь, высвободившаяся для нужд индустрии и сельского хозяйства, составила 730 км². Основное русло длиной 74 км было стабилизировано, сравнительно короткие опасные участки на протяжении 200 км обвалованных берегов были дополнительно армированы.

Работы по выправлению русла не имели цели избавиться от бора; более того, так как в устье р. Цяньтан образуется самый высокий в мире бор, наблюдать за которым собирается множество туристов, – было стремление сохранить бор. После русловыправительных работ на прямом участке реки рост приливного уровня составляет 27–41 см. Рост отливного уровня больше на по-

Таблица 2. Изменения параметров эстуария р. Цяньтан за счет осушения части площади приливных осушек и выправления русла [31] (A – площадь поперечного сечения, B – ширина, H – средняя глубина потока, h – величина прилива в рассматриваемом сечении, Q_e и q_e – соответственно расход и удельный расход воды на отлив; здесь и в табл. 3 верхнее и нижнее значения параметров получены до и после выправления русла)

Створ	B , м	H , м	A , м ²	h , м	$P_t \times 10^8$, м ³	Q_e , м ³ /с	q_e , м ² /с
Цанцянь	$\frac{2059}{1802}$	$\frac{1.8}{174}$	$\frac{3688}{3130}$	$\frac{1.75}{2.01}$	$\frac{0.80}{0.70}$	$\frac{3625}{3333}$	$\frac{1.76}{1.84}$
	$\frac{4097}{1806}$	$\frac{2.87}{3.0}$	$\frac{11870}{5440}$	$\frac{4.15}{3.73}$	$\frac{3.0}{1.85}$	$\frac{10386}{6915}$	$\frac{2.53}{3.82}$
Цзяньшань	$\frac{16740}{8415}$	$\frac{3.1}{3.75}$	$\frac{52180}{28250}$	$\frac{4.58}{4.42}$	$\frac{10.0}{5.0}$	$\frac{33000}{17270}$	$\frac{1.97}{2.05}$

стах среднего участка, чем нижних и верхних по течению постах [31]. Следовательно, амплитуда прилива уменьшается на средних и растет на верхних и нижних участках. На искривленном участке реки и приливный, и отливный уровни воды понижаются, причем понижение отливных уровней более значительно, чем приливных, что свидетельствует о росте амплитуды прилива. Общая тенденция заключается в росте приливного уровня (табл. 2) и постепенном увеличении его вверх по течению на прямолинейном участке реки. Отливные уровни выше г. Цзяньшань изменяются за счет эрозии/отложения наносов в русле, и амплитуда прилива изменяется соответственно. На отливные уровни на постах Ганьпу и Чжапу не влияют деформации дна реки на верхних участках, в то время как приливные уровни растут за счет сужения потока вверх по течению, и, следовательно, амплитуды приливов растут.

Таблица 3. Изменение числа случаев превышения уровнем воды заданного значения Δh в год на разных станциях вдоль эстуария р. Цяньтан в 1955 г. (до выправления) и 1995 г. (после выправления)

Станция	Δh , м	N_1 (1955 г.)	N_2 (1995 г.)	N_2/N_1
Чжапу	>5.5	18	44	$\frac{2.4}{1.54}$
	5–5.5	89	137	
Ганьпу	>6.5	2	6	$\frac{3}{2}$
	6.0–6.5	31	61	
Яньгуань	>6	30	181	$\frac{6}{1.16}$
	5.6–6.5	121	141	
Цанцянь	>7.0	65	163	$\frac{2.5}{1.18}$
	6.5–7.0	102	120	
Цибяо	>7.5	7	92	$\frac{13.1}{4.7}$
	7–7.5	27	127	
Ханчжоу	>8	7	26	$\frac{3.7}{8.1}$
	7.5–8.0	8	65	

Во время сизигийного прилива динамическое воздействие на дамбы и интрузия соленых вод намного сильнее, чем в течение средних приливов. После русловыправительных работ приливно-отливные уровни и амплитуды приливов в сизигию возросли в 90% случаев, а при средних приливах – в 50%. После выправления русла рост среднего приливного/отливного уровня воды в сизигию вызывает большую приливную скорость потока и более сильное отражение приливной волны. В табл. 3 показаны случаи превышения приливных уровней воды над разными поднятиями уровня воды в году на прямолинейном участке до и после русловыправительных работ (1955, 1995 гг.). После выправления русла уровень воды во время соответствующих фаз прилива стал больше в 1.16–13.1 раза, чем был до выправления, причем максимальный рост уровня воды наблюдается в Цибяо, а на станциях ниже по течению реки он уменьшается.

Дальность проникновения (L) осолоненных вод в устье р. Цяньтан изменялась в результате работ по выправлению русла [30] и регулированию стока реки. В естественном режиме L составляет ~150 км, после зарегулирования стока ~120 км, после русловыправительных работ ~130 км (рис. 3б). Суммарный эффект от регулирования стока воды и русловыправления – уменьшение L на ~20 км.

р. Сена

В XIX в. в эстуарии р. Сены наблюдался один из самых высоких и опасных боров. Высота гребня бора доходила до 7.5 м, а скорость движения – до 10 м/с [12]. Бор распространялся на расстояние 80 км от устьевого створа эстуария, находящегося у г. Трувиль, и достигал Руана, представляя опасность для судоходства на этом участке. Активность волн бора способствовала образованию мигрирующих устьевых баров. Волны бора меньшей высоты также наблюдались и в притоках Сены [36].

Параметр W/P_t , рассчитанный по площади эстуария $F = 104.5 \text{ км}^2$, полученной по современным космическим снимкам [4], равен 0.024. В результате выправительных работ и строительства дамб в русле Сены с 1834 по 1978 г. площадь эстуария уменьшилась в ~4 раза (с 129.5 до 31.0 км²) [13]. Расчет по этим данным дает $W/P_t = 0.08$, т.е. за 33 года роль речного стока уменьшилась. После начала выправления русла бор исчез, а через некоторое время появился снова, что объясняется постепенным уменьшением глубины за счет занесения русла наносами. Регулярные дноуглубительные работы для достижения стабильной навигационной глубины привели к увеличению глубины с 3 м в естественном состоянии до 6 м. После этого бор исчез окончательно.

Дальность проникновения осолоненных вод в эстуарий Сены постоянно уменьшается из-за удлинения искусственных песчаных молов в устье эстуария и уменьшения площади эстуария за счет занесения его наносами [13]. Небольшая глубина и искусственное сокращение ширины эстуария приводят к полному перемешиванию речных и морских вод в эстуарии и отсутствию двухслойной циркуляции, характерной для более глубоких эстуариев. В 1955–1956 гг. осолоненные воды в межень проникали на 70 км от устьевого створа. К настоящему времени из-за выправления русла и удлинения молов граница максимального проникновения осолоненных вод сместилась на 20 км вниз по течению.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее важными условиями формирования бора являются величина прилива и форма эстуария. На основе рассмотрения географического положения некоторых устьев рек, в которых образуются волны бора, можно отметить, что нет четкой границы максимального прилива, необходимой для формирования волны бора. Например, в Северном рук. р. Янцзы бор формируется при сравнительно небольшой величине прилива — $h = 3.3 \text{ м}$, а в рукавах р. Амазонки — при $h = 6.0 \text{ м}$.

Форма эстуария характеризуется скоростью сужения потока dB/dL и скоростью изменения глубины dH/dL (L — расстояние вдоль реки). Параметр dH/dL представляется существенным для возникновения бора. Для подтверждения этого соображения рассмотрим р. Мезень, эстуарий которой имеет классическую воронкообразную форму. В устьевом створе этого эстуария (м. Масляный — м. Рябинов [1]) величина сизигийного прилива достигает 7.8 м, т.е. величина прилива

вполне достаточна для образования бора. Длина эстуария от устьевого створа между мысами Масляный и Рябинов до г. Мезень составляет ~40 км. По параметру $W/P_t = 0.03$ эстуарий р. Мезень относится к типу частично перемешанных эстуариев со слабой стратификацией. Величина изменения ширины ($dB/dL \cong 0.2$) характерна для устьев эстуарного типа. Глубина в устьевом створе р. Мезень ~5 м, скорость течения за время приливного цикла изменяется от — 1.4 до 1.4 м/с [1]. Летом среднегодовой солёности воды в устьевом створе на поверхности и в придонном слое практически одинакова (28‰), а вверх по течению реки уменьшается до 14‰ в с. Окулово (16 км от устьевого створа). В другие периоды года солёность воды придонного слоя бывает несколько больше (2–4‰), чем у поверхности. Это означает, что оценка W/P_t хорошо описывает тип смешения и стратификации вод в эстуарии. Высота приливной волны некоторое время растет при продвижении волны в эстуарий [1], но не достаточно, чтобы образовать волну бора. Глубина эстуария р. Мезень убывает постепенно со средним уклоном $dH/dL \cong 1.3 \times 10^{-2}$, что препятствует образованию бора. Число Фруда, рассчитанное для этого эстуария по скорости течения и глубине в устьевом створе: $Fr_b = 0.5$, т.е. вдвое меньше, чем граничное для бора: $Fr_b = 1$.

ВЫВОДЫ

Описание бора с помощью уравнений для квазистационарного гидравлического прыжка позволяет определить критическое число Фруда для потока, при котором приливная волна становится бором: $Fr_b \geq 1$.

Основными условиями существования бора в эстуарии являются величина прилива не менее 3–4 м и быстро сужающаяся форма эстуария. Анализ параметра сужения эстуария для семи устьев рек, особенно р. Цяньган (табл. 1), показал, что $dB/dL \geq 0.1$ — достаточная величина для существования бора.

Коэффициенты турбулентной диффузии потока при прохождении волны бора на порядок превосходят коэффициенты речного потока и обеспечивают полное перемешивание массы воды на границе образования бора.

Влияние волны бора на перенос осолоненных вод вверх по течению реки зависит от расположения в русле границы образования бора. В некоторых случаях, когда бор формируется выше границы интрузии осолоненных вод (реки Амазонка, Дордонь, Гаронна, рук. Хугли), он не влияет на распро-

странение осолоненных вод. В случае образования бора в сечении, куда доходят осолоненные воды, бор способствует их полному перемешиванию и переносу вверх по течению реки. Особенно заметно влияние бора на колебания солености воды в эстуарии р. Северн.

Значительное искусственное уменьшение площади эстуария вызывает увеличение расстояния, на которое осолоненные воды проникают в устье. Для уменьшения этого расстояния при осушении части площади эстуария необходимы дополнительные мероприятия по регулированию стока реки. Углубление судоходного канала приводит к исчезновению бора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демиденко Н.А., Ефимова Л.Е., Ефремова Н.А., Юркин М.М. Гидрометеорологический режим эстуариев рек Мезени и Кулоя и возможное изменение при строительстве мезенской ПЭС // "Экология арктических и приарктических территорий". Матер. Междунар. симпоз. Архангельск, 2010. С. 70–72.
2. Долгополова Е.Н. Коэффициент вертикального переноса в природных потоках // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 4. С. 429–437.
3. Долгополова Е.Н., Исупова М.В. Динамика вод и наносов в устьевой области р. Св. Лаврентия // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 4. С. 422–438.
4. Кравцова В.И., Митькиных Н.С. Устья рек мира в атласе космических снимков // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 1. С. 3–19.
5. Мак-Доуэлл Д.М., О'Коннор Б.А. Гидравлика приливных устьев рек / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
6. Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 176 с.
7. Михайлов В.Н. Сток воды и наносов в устье Амазонки // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 2. С. 150–163.
8. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 1. С. 41–55.
9. Михайлов В.Н., Горин С.Л., Михайлова М.В. Новый подход к определению и типизации эстуариев // Вестн. МГУ. 2009. Сер. 5, География. № 5. С. 3–11.
10. Михайлов В.Н., Доценко М.А. Особенности гидрологического режима устьевой области рек Ганга и Брахмапутра // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 4. С. 389–409.
11. Михайлов В.Н., Кортаев В.Н., Михайлова М.В. и др. Гидрологический режим и морфодинамика устьевой области р. Янцзы // Вод. ресурсы. 2001. Т. 28. № 4. С. 389–401.
12. Михайлова М.В., Исупова М.В. Циркуляция вод, динамика наносов и эрозионно-аккумулятивные процессы в эстуарии Жиронда (Франция) // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 1. С. 14–28.
13. Михайлова М.В., Исупова М.В. Динамика вод и наносов в эстуарии и на устьевом участке р. Сены // Вод. ресурсы. 2007. Т. 34. № 1. С. 41–55.
14. Спицын И.П., Соколова В.А. Общая и речная гидравлика. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 359 с.
15. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: Энергоатомиздат, 1991. Т. 1. 232 с.
16. Bassindale R. Studies on the Biology of the Bristol Channel: XI. The Physical Environment and Intertidal Fauna of the Southern Shores of the Bristol Channel and Severn Estuary // J. Ecology. 1943. V. 31. №. 1. P. 1–29.
17. Bassindale R. A comparison of the varying salinity conditions of the Tees and Severn estuaries // J. Animal Ecology. 1943. V. 12. № 1. P. 1–18.
18. Bowden K.F., Gilligan R. M. Characteristic features of estuarine circulation as represented in the Mersey estuary // Limnology and oceanography. 1971. V. 16. № 3. P. 490–502.
19. Bowden K.F., Sharaf El Din. Circulation and mixing in the Mersey estuary // Geophysical J. Royal Astronomical Society. 1966. V. 10. № 4. P. 383–399.
20. Chanson H. Environmental, ecological and cultural impacts of tidal bores benaks, bonos and burros // Proc. Intern. Workshop on Environ. Hydraulics: theoretical, experimental and computational solutions. Valencia, 2009. P. 1–20.
21. Chanson H., Tan K.-K. Turbulent mixing of particles under tidal bores: an experimental analysis // J. Hydr. Res. 2010. V. 48. № 5. P. 641–649.
22. Chen S. Tidal bore in the North branch of the Changjiang estuary // Proc. Intern. Conf. Estuaries and Coasts. Hangzhou (China), 2003. P. 1–8.
23. Chen J., Li D., Yao Y. et al. Marine hazards in coastal areas and human action against them – a case study of the Changjiang river estuaries and Qiantang river // Chinese J. Oceanology and Limnology. 1999. V. 17. № 2. P. 143–154.
24. Chugh R.S. Tides in Hooghly river // Hydrol. Sci. J. 2009. V. 6. № 2. P. 10–26.
25. Donnelly C., Chanson H. Environmental impact of undular tidal bores in tropical rivers // J. Environ. Fluid Mechanics. 2005. V. 5. № 5. P. 481–494.
26. Fu G., Chen J., Jiang W. Scenario Studies on the Salinity Intrusions in the Yangtze Estuary. <http://www.paper.edu.cn>
27. Furuyama S., Chanson H. A Numerical study of open channel flow hydrodynamics and turbulence of the tidal bore and dam-break flows. Hydraulic Model Report № CH66/08. Brisbane: University of Queensland, 2008. 88 p.
28. Geyer W. R., Beardsley R.C., Candela J. et al. The physical oceanography of the Amazon outflow // Oceanography. 1991. April. P. 8–14.

29. *Guohong F.* Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China // *J. Oceanology and Limnology*. 1986. V. 4. № 1. P. 1–16.
30. *Han Z., Pan C., Yu J., Chen H.* Effect of large-scale reservoir and river regulation/reclamation on saltwater intrusion in Qiantang Estuary // *Science in China (Series B)*. 2001. V. 44. Supp. № 8. P. 221–229.
31. *Han Z., Xu Y., Lin B., Xuan W.* Variation of tides and river regime after river training in the Qiantang estuary // *Intern. Conf. Estuaries and Coasts*. Hangzhou, 2003. P. 66–80.
32. *Hansen D.V., Rattray M.* Gravitational circulation in straits and estuaries // *J. Mar. Res.* 1965. V. 23. P. 104–122.
33. *Hornung H.G., Willert C., Turner S.* The Flow Field Downstream of a Hydraulic Jump // *J. Fluid Mech.* 1995. V. 287. P. 299–316.
34. http://en.wikipedia.org/wiki/Amazon_River
35. <http://www.tidalbore.info/france/gironde.html>
36. <http://www.tidalbore.info/france/seine.html>
37. http://en.wikipedia.org/wiki/Tidal_bore#Rivers_with_tidal_bores
38. *Koch C., Chanson H.* Turbulence measurements in positive surges and bores // *J. Hydr. Res.* 2009. V. 47. № 1. P. 29–40.
39. *Mills A.D.* A dictionary of English place-names. Oxford: Oxford University Press, 1998. 240 p.
40. *Mukhopadhyay S.K.* The Hooghly Estuarine System, NE Coast of Bay of Bengal, India // *Proc. Workshop on Indian Estuaries*. Goa: NIO, 2007. P. 1–26.
41. *Pan C.-H., Lin B.-Y., Mao X.-Z.* Case study: numerical modeling of the tidal bore on the Qiantang river, China // *J. Hydraulic Engineering, ASCE*. 2007. V. 133. № 2. P. 130–138.
42. *Pethick J.* Review and formalization of geomorphological concepts and approaches for estuaries. Technical Report FD2116/TR2. London: Nobel House, 2006. 326 p.
43. *Prandle D.* Salinity intrusion in estuaries // *J. Physical Oceanography*. 1981. V.11. № 10. P. 1311–1324.
44. *Roberts P.J.R., Webster D.* Turbulent diffusion // *Environ. fluid mechanics – Theories and Application*. Reston: ASCE Press, 2002. 467 p.
45. *Rosário R.P., Bezerra M.O., Vinzón S.B.* Dynamics of the saline front in the Northern channel of the Amazon river – influence of fluvial flow and tidal range (Brazil) // *J. Coastal Research*. 2009. V. 56. Special Issue. P. 1414–1418.
46. *Tomczak M., Godfrey J.S.* Regional Oceanography: an Introduction. 2nd improved edition. Delhi: Daya Publishing House, 2003. 390 p.
47. *Uncles R.J., Jordan M.B.* Residual fluxes of water and salt at two stations in the Severn Estuary // *Estuarine and Coastal Marine Science*. 1979. V. 9. № 3. P. 287–302.
48. *Uncles R.J., Radford P.J.* Seasonal and spring-neap tidal dependence on axial dispersion coefficients in the Severn – a wide, vertically mixed estuary // *J. of Fluid Mech.* 1980. V. 1. P. 703–726.
49. *Wolanski E., Williams D., Spagnol S., Chanson H.* Undular Tidal bore dynamics in the Daly Estuary, Northern Australia // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2004. V. 60. № 4. P. 629–636.