

УДК 532.465

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ КЛИНА СОЛЕННЫХ ВОД В РУКАВ БЫСТРЫЙ ДЕЛЬТЫ ДУНАЯ

В. МАДЕРИЧ, М. МОРГУНОВ, В. КОШЕБУЦКИЙ

*Институт проблем математических машин и систем, Киев*

*Получено 27.06.2005*

Даны оценки проникновения клина морской воды в рукав Быстрый до и после устройства судоходного канала на основе расчетов с помощью двухслойной и трехмерной гидродинамических моделей. Показана существенная роль вовлечения вод из нижнего слоя, приводящая к вертикальной циркуляции вод и наличию компенсирующего притока соленых вод у дна, достигающего в устье рукава 15% от расхода в верхнем слое.

Подані оцінки проникнення морської води в рукав Бистрий до і після будівництва судоходного каналу на основі розрахунків за допомогою двошарової і тривимірної гідродинамічних моделей. Показана суттєва роль втягнення води з нижнього шару, що приводить до вертикальної циркуляції води і появи компенсуючого потоку солоної води біля дна, який досягає 15% від витрати верхнього шару.

The estimates of penetration of salt wedge before and after ship channel construction in the Bystry reach using two layer hydraulic model and three-dimensional hydrodynamics model are given. The essential role of entrainment of water from lower layer that result in vertical circulation and compensative flow of salt water near bottom that amounts to 15% of the discharge in the upper layer in the reach mouth.

## ВВЕДЕНИЕ

Проникновение соленых вод в устье впадающих в море рек – обычное явление для равнинных рек с не очень большими скоростями течения. Оно обусловлено градиентом давления, который возникает за счет разницы плотностей между речной и морской водами. В зависимости от морфометрии устьевой части рек, от скоростного режима реки и от условий в море проникающие морские воды формируют однородный по горизонтали гидрофронт в относительно широких и мелких эстуариях либо двухслойную стратификацию с клином соленых вод, который распространяется вдоль дна устьевой части реки. Между этими предельными случаями существуют промежуточные режимы с плавным изменением стратификации вдоль устьевом участка реки. Постоянное наличие соленого клина приводит к подавлению перемешивания и возникновению условий дефицита кислорода в придонных слоях. Углубление русла для создания судоходных каналов может привести к заметному увеличению расстояния, на которое проникает клин соленых вод, и тем самым к изменению состояния экосистемы устьевой части реки. Примером может служить Днепро-Бугский лиман, в котором соленые воды в межень проникают через весь лиман глубоко в дельту Днепра, проходя по глубоководному судоходному каналу и создавая тем самым условия для аноксии придонных вод. В дельте Дуная проникновение морских вод

наблюдалось в искусственно углубленных судоходных рукавах Прорва и Сулинский [1].

Создание в 2004 году первой очереди глубоководного навигационного канала Черное море – Дунай в украинской части дельты Дуная через рукава Быстрый и Старостамбульский вызвало необходимость оценки условий проникновения морских вод в эти рукава. Длина рукава Быстрый составляет 9.2 км, ширина – 210 м, средняя глубина – 6 м. На рис. 1, а приведена батиметрическая карта мористой части рукава до строительства судоходного канала. Рукав соединялся с морем через мелководный бар с глубинами около 2 м. Руслоформирующий расход воды в рукаве равен  $1560 \text{ м}^3/\text{с}$ . Меженный расход составляет около  $500 \text{ м}^3/\text{с}$ . В 2003 году в июле наблюдался абсолютный минимум (приблизительно 0.05-процентной обеспеченности) расхода в  $400 \text{ м}^3/\text{с}$ . Данные о характере проникновения соленых вод в Быстрый отсутствуют, но по аналогии с Прорвой и Сулинским рукавом следует ожидать формирования клина осолоненных вод. Прорезь в баре Быстрого после устройства судоходного канала полного профиля глубиной  $H=8.7 \text{ м}$  будет иметь ширину по дну  $B=100 \text{ м}$  (рис.1, б). Для защиты прорези с северо-востока от действия волн и течения создается дамба, первая очередь которой строится.

В настоящей статье даны оценки проникновения клина морской воды в рукав Быстрый до и после устройства судоходного канала на основе расчетов с помощью двухслойной гидравлической модели и трехмерной гидродинамической модели ТРИ-

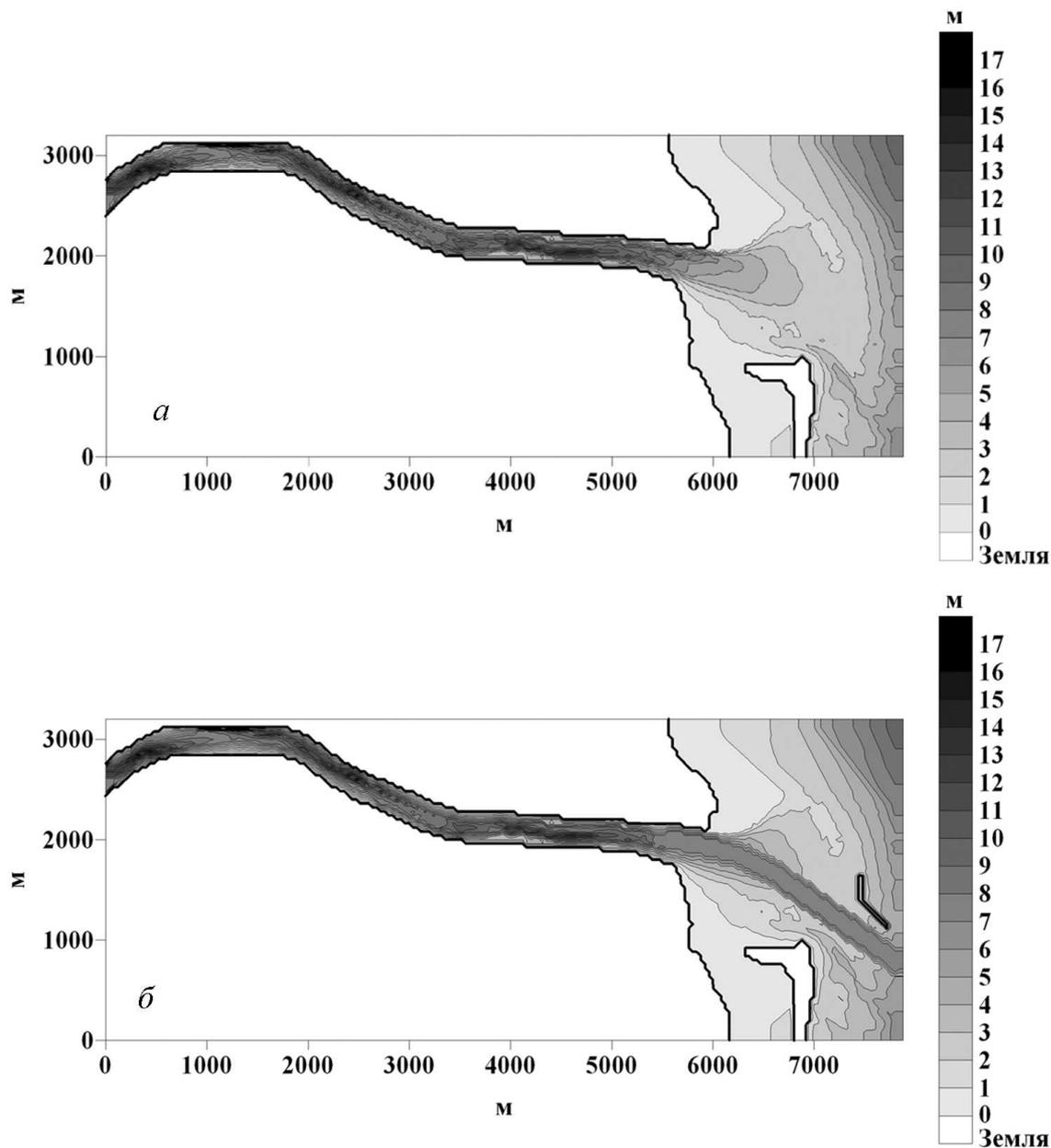


Рис. 1. Батиметрия мористого участка рукава Быстрый до (а) и после (б) строительства судоходного канала

ТОКС [2].

## 1. ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЛЕНОГО КЛИНА В КАНАЛЕ

### 1.1. Модель

Начиная с работ [3-4], развивается теория внутренней гидравлики течений в эстуариях. Основными приближениями теории являются прибли-

жение Буссинеска и гидростатики. Задача решается для стационарного двухслойного потока при отсутствии вовлечения воды из нижнего слоя, находящегося поэтому в состоянии покоя. Предполагается, что поперечное сечение канала резко увеличивается на мористом конце. Это приводит к внутренней критичности потока. В рамках этой теории были получены решения, описывающие продольное распределение клина соленой воды в эстуариях прямоугольного сечения [3-5]. Здесь мы

обобщим их на случай более реалистичного трапециoidalного поперечного профиля дна. Исходные уравнения движения имеют вид

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - c_i \frac{u^2}{H_1}; \quad (1)$$

$$0 = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g' \frac{\partial D_1}{\partial x} + c_i \frac{u^2}{H_2}. \quad (2)$$

Здесь  $x$  – расстояние вдоль канала, отсчитываемое от головы клина к устью;  $u$  – скорость в верхнем слое;  $\zeta$  – отклонение уровня;  $H_1, H_2$  – толщины верхнего и нижнего слоев ( $H = H_1 + H_2$ );  $D_1$  – расстояние от невозмущенной поверхности воды до поверхности раздела;  $g' = g(\Delta\rho/\rho_0$  – приведенное ускорение силы тяжести;  $\Delta\rho$  – перепад плотности между морской и пресной водой;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $c_i$  – коэффициент трения между слоями. Исключая  $\zeta$ , находим, что

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = -g' \frac{\partial D_1}{\partial x} - c_i \left( \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right) u^2. \quad (3)$$

Для канала постоянной глубины при  $\zeta \ll H$  площадь поперечного сечения  $A = A_1 + A_2 \approx \text{const}$ , где  $A_1, A_2$  – площади поперечного сечения верхнего и нижнего слоев. Положим  $n = A_1/A$ , тогда  $A_1 = nA, A_2 = (1 - n)A$ . Полный поток в верхнем слое  $Q = uA_1 = unA$ . Площади поперечного сечения верхнего слоя и всего трапециoidalного канала равны

$$A_1 = \frac{1}{2}(y_n + y_s)D_1, \quad A = \frac{1}{2}(y_b + y_s)D, \quad (4)$$

где  $y_s, y_n, y_b$  – ширина канала на свободной поверхности, на поверхности раздела и на дне соответственно;  $D = D_1 + D_2 = \text{const}$ . Ширина поверхности раздела

$$y_n = y_s - (y_s - y_b) \frac{D_1}{D}. \quad (5)$$

Поскольку

$$n = \frac{A_1}{A} = \frac{y_s^2 - y_n^2}{y_s^2 - y_b^2}, \quad (6)$$

нетрудно показать, что

$$y_n^2 = (1 - n)y_s^2 + ny_b^2. \quad (7)$$

Толщина верхнего слоя выражается через  $n$ :

$$D_1 = ny_m D, \quad (8)$$

где

$$y_m = \frac{y_s + y_b}{y_s + y_n}. \quad (9)$$

После преобразований с учетом соотношений (4)–(9) задача сводится к решению уравнения

$$(1 - F^2) \frac{\partial n}{\partial \tilde{x}} = -c_i \frac{F^2}{y_m(1 - ny_m)} \quad (10)$$

с начальным условием на носике соленого клина

$$\tilde{x} = 0 : n = 1. \quad (11)$$

Здесь  $\tilde{x} = x/D$ ;

$$F^2 = \frac{Q^2 y_n}{g' A^3 n^3} = \frac{u^2}{g' H_1^*}, \quad (12)$$

где  $F^2$  – внутреннее число Фруда,  $H_1^*$  – эффективная толщина верхнего слоя. Условие критичности потока на выходе из канала имеет вид

$$x = L : F^2 = 1. \quad (13)$$

Оно служит для определения неизвестной длины соленого клина. Заметим, что уравнение (10) имеет особенности при  $x = 0$  и  $x = L$ .

Для прямоугольного канала

$$n = D_1/D, \quad y_n = \text{const}, \quad y_m = 1. \quad (14)$$

Уравнение (10) переписывается в виде

$$\left( 1 - \frac{F_0^2}{n^3} \right) \frac{\partial n}{\partial \tilde{x}} = -c_i \frac{F_0^2}{n^3(1 - n)}, \quad (15)$$

где

$$F_0^2 = \frac{Q^2}{g' y_n^2 D^3} = \frac{u^2}{g' H}. \quad (16)$$

Условие (13) имеет вид

$$x = L : n = F_0^{2/3}. \quad (17)$$

Решение уравнения (16) получено в [4] и имеет вид:

$$\frac{1}{4F_0^2} n^4 - \frac{1}{5F_0^2} n^5 + \frac{1}{2} n^2 - n = c_i x + \frac{1}{20F_0^2} - \frac{1}{2}. \quad (18)$$

Длина соленого клина находится из уравнения

$$L = \frac{1}{4c_i} \left( \frac{1}{5F_0^2} + 3F_0^{2/3} - \frac{1}{2} - \frac{6}{5} F_0^{4/3} \right). \quad (19)$$

Формулы (18)–(19) неплохо согласуются с лабораторными экспериментами [5] при должном выборе коэффициента трения, являющегося в рамках

Табл 1. Параметры сценария 1

Кривая	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta S, \text{ ‰}$	$L, \text{ м}$	$u_r, \text{ м/с}$	$u_{max}, \text{ м/с}$
1	400	8	2913	0.32	0.64
2	800	8	42	0.64	0.74

теории свободным постоянным параметром. Модифицированная с учетом пристенного трения гидравлическая модель также нашла подтверждение в эксперименте [8], проведенном в узком канале с преобладанием пристенного трения и при небольших числах Рейнольдса. Значение  $c_i$  можно определить, сопоставляя данные натурных измерений длины соленого клина с расчетами. Ограничением рассмотренной модели служит предположение об отсутствии вовлечения вод соленого клина и следующее из него предположение об отсутствии течений внутри клина. В рамках гидравлической теории этот недостаток устранен в работах [6-7], в которых показано, что учет вовлечения эквивалентен заданию  $c_i$  как функции числа Фруда соленого клина  $F_0$  и числа Рейнольдса  $Re = uH/\nu$ , где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости. Для больших чисел Рейнольдса параметр  $c_i$  изменяется от значения  $c_i = 0.0005 \div 0.001$  при  $F_0 = 1.0 \div 0.6$  до  $c_i = 0.0005 \div 0.0001$  при  $F_0 = 0.4 \div 0.2$ . В настоящей работе использовались значения  $c_i = 0.0005 \div 0.0002$ .

**1.2. Применение гидравлической модели для оценки распространения соленого клина в рукаве Быстрый**

Оценим характеристики солевого клина в зависимости от расхода воды для двух сценариев.

1. Конфигурация рукава с баром до прорыва судходного канала и подтоком соленых вод вдоль берега. Соленость при входе в рукав составляет примерно половину от солености в море ( $S=8 \text{ ‰}$ ).

2. Рукав с прорезью в баре. Соленость придонных вод равна солености морской воды  $S=17 \text{ ‰}$ .

В обоих случаях полагаем, что рукав начинается от линии берега, т.е. наличие прорези изменяет только соленость в устье. Форму дна аппроксимируем трапецией: ширина на поверхности  $y_s=210 \text{ м}$ , ширина по дну  $y_b=104 \text{ м}$ , максимальная глубина  $H=8 \text{ м}$ . Оба сценария приведены в таблицах 1-2, где  $u_r$  – скорость воды в канале,  $u_{max}$  – максимальная скорость в верхнем слое.

Из результатов расчетов для сценариев 1 и 2,

Табл 2. Параметры сценария 2

Кривая	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta S, \text{ ‰}$	$L, \text{ м}$	$u_r, \text{ м/с}$	$u_{max}, \text{ м/с}$
1	400	12	5651	0.32	0.77
2	800	12	272	0.64	0.86
3	400	17	9329	0.32	0.90
4	800	17	767	0.64	0.99

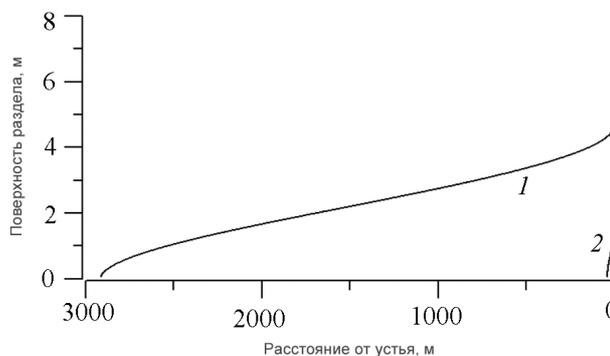


Рис. 2. Форма соленого клина в зависимости от расхода и перепада солености (сценарий 1)

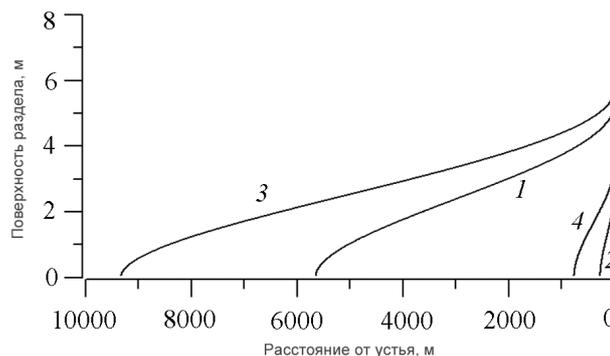


Рис. 3. Форма соленого клина в зависимости от расхода и перепада солености (сценарий 2)

соответственно представленных на рис. 2–3, видно, что положение соленого клина и характеристики течения определяются расходом воды и перепадом плотности (солености) между речной и морской водой. В частности:

1. При всех значениях перепада солености соленый клин не проникает в рукав при расходах более  $800\text{-}900 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

2. Создание прорези повышает соленость на входе в рукав, что, в свою очередь, приводит к увеличению длины соленого клина примерно в 1.5–2 раза;

3. Скорости течений в верхнем слое в случае наличия соленого клина возрастают до  $0.7 - 1 \text{ м/с}$  на выходе из рукава.

Следует иметь в виду приближенный характер этих оценок, опирающихся на предположения о характере поля солености в приустьевой яме и об отсутствии вовлечения воды из соленого клина в верхний слой. Эти оценки имеют “консервативный” характер и завышают расстояние проникновения соленых вод в канал.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СОЛЕНОГО КЛИНА С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ТРИТОКС

### 2.1. Модель

В данном разделе представлены результаты расчетов трехмерных полей солености в устье Быстрого. Расчеты проводились с помощью бароклинной модели со свободной поверхностью ТРИТОКС [2]. Уравнения движения и неразрывности, записанные в приближении Буссинеска и гидростатики, дополняются уравнениями переноса тепла и соли и уравнением состояния. Система осредненных по Рейнольдсу уравнений гидротермодинамики дополнялась  $\kappa$ - $\varepsilon$  моделью турбулентности. Использование двойной  $\sigma$ -системы координат позволило описать сложную батиметрию. При численном решении задачи использовалось расщепление полей скорости на среднюю по глубине (баротропную) составляющую и бароклинную составляющую [9], что позволило проводить расчеты для этих составляющих с различными шагами по времени. Система уравнений задачи решалась конечно-разностным методом второго порядка. Уравнения для баротропных составляющих скорости уровня решались по явной схеме, тогда как для членов с вертикальной вязкостью и диффузией применяется неявная схема. Для адвективных членов в уравнениях переноса скаляров использовалась схема второго порядка.

Поток тепла через поверхность водоема включает долю потока приходящей солнечной радиации, затраты тепла на испарение, турбулентный поток тепла и баланс длинноволновой радиации. На твердых боковых границах задаются условия прилипания для горизонтальных составляющих скорости и отсутствия потоков скаляров. На участках границы со втоком вод задаются расходы и значения температуры и солености. Особую сложность представляет задание граничных условий на морских границах, когда течения меняют знак. В части границы, где жидкость втекает, задаются значения уровня и скалярных переменных при нулевом градиенте скорости. Там, где жидкость выте-

кает, используются условия излучения для скорости и уровня. Детально модель описана в [2].

### 2.2. Граничные условия и сценарии моделирования.

Для моделирования процессов проникновения соленого клина в рукав Быстрый были заданы следующие значения параметров, типичные для периода низких расходов в октябре:

- скорость ветра – 0.5 м/с;
- температура воздуха – 15°C;
- относительная влажность – 0.07;
- облачность – 0.5;
- атмосферное давление – 1013.25 ГПа;
- распределение температуры на морских границах: на глубине до 2 м – 15°C, на глубине от 7 м – 10°C;
- распределение солености на морских границах: на глубине до 2 м – 5 ‰, на глубине от 7 м – 18 ‰;
- на входе Быстрого задавались расход воды  $Q_0=400 \text{ м}^3/\text{с}$ , температура 15°C и соленость 0 ‰.

В начальный момент времени рукав был заполнен морской водой. Расчеты проводились на установившемся для двух сценариев:

1. Батиметрия до строительства судоходного канала и защитных дамб (рис. 1, а);
3. Батиметрия с учетом наличия судоходного канала и дамбы первой очереди (рис. 1, б).

### 2.3. Результаты расчетов

Результаты расчетов представлены на рис. 4–6. Как видно на рис. 4, при экстремально низких расходах соленый клин проникает в рукав Быстрый через ложбины в баре даже при естественных условиях. Вовлечение соленой воды из нижнего слоя приводит к возникновению компенсационного потока в нижнем слое (рис. 4, в), достигающего, как следует из рис. 6,  $70 \text{ м}^3/\text{с}$ . Эта картина течений и поля солености согласуется с лабораторными экспериментами [6–7], в которых также возникла циркуляция в нижнем слое. Создание прорези в баре усиливает продвижение соленых вод в рукав и увеличивает длину соленого клина до 4 км (рис. 5). Соответствующие изменения в расходах в верхнем и нижнем слоях, как следует из рис. 6, не очень велики. Следует отметить, что наличие постоянного подтока вод из моря уменьшает риск возникновения аноксии в устьевом участке рукава.

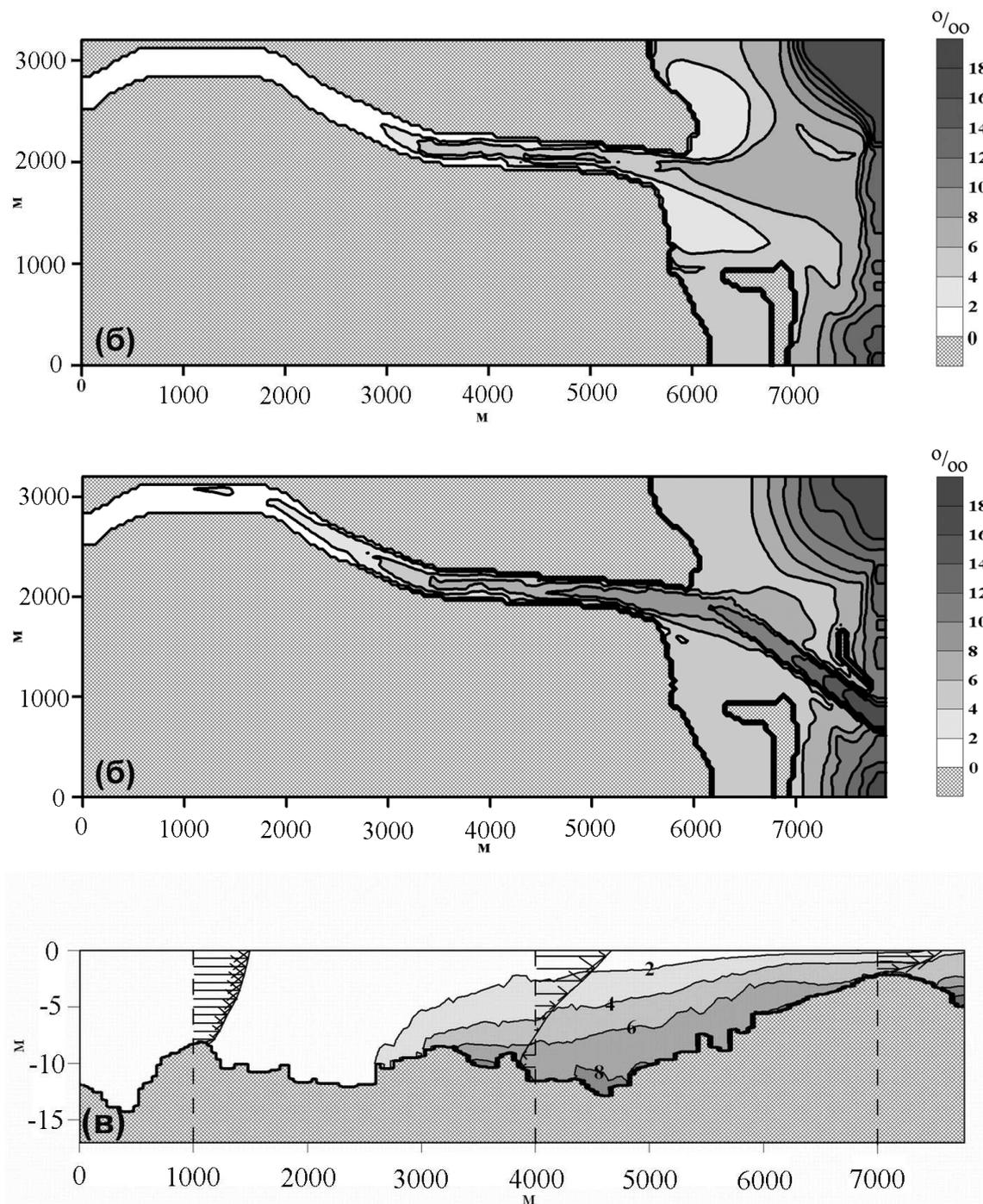


Рис. 4. Распределение солености на поверхности (а), на дне (б) и вертикальный разрез поля солености (в) для сценария 1

Дополнительные расчеты показали, что наличие дамбы существенно не влияет на распространение соленого клина.

#### ВЫВОДЫ

На основании результатов расчетов с помощью двухслойной гидравлической модели и трехмерной модели ТРИТОКС можно сделать вывод,

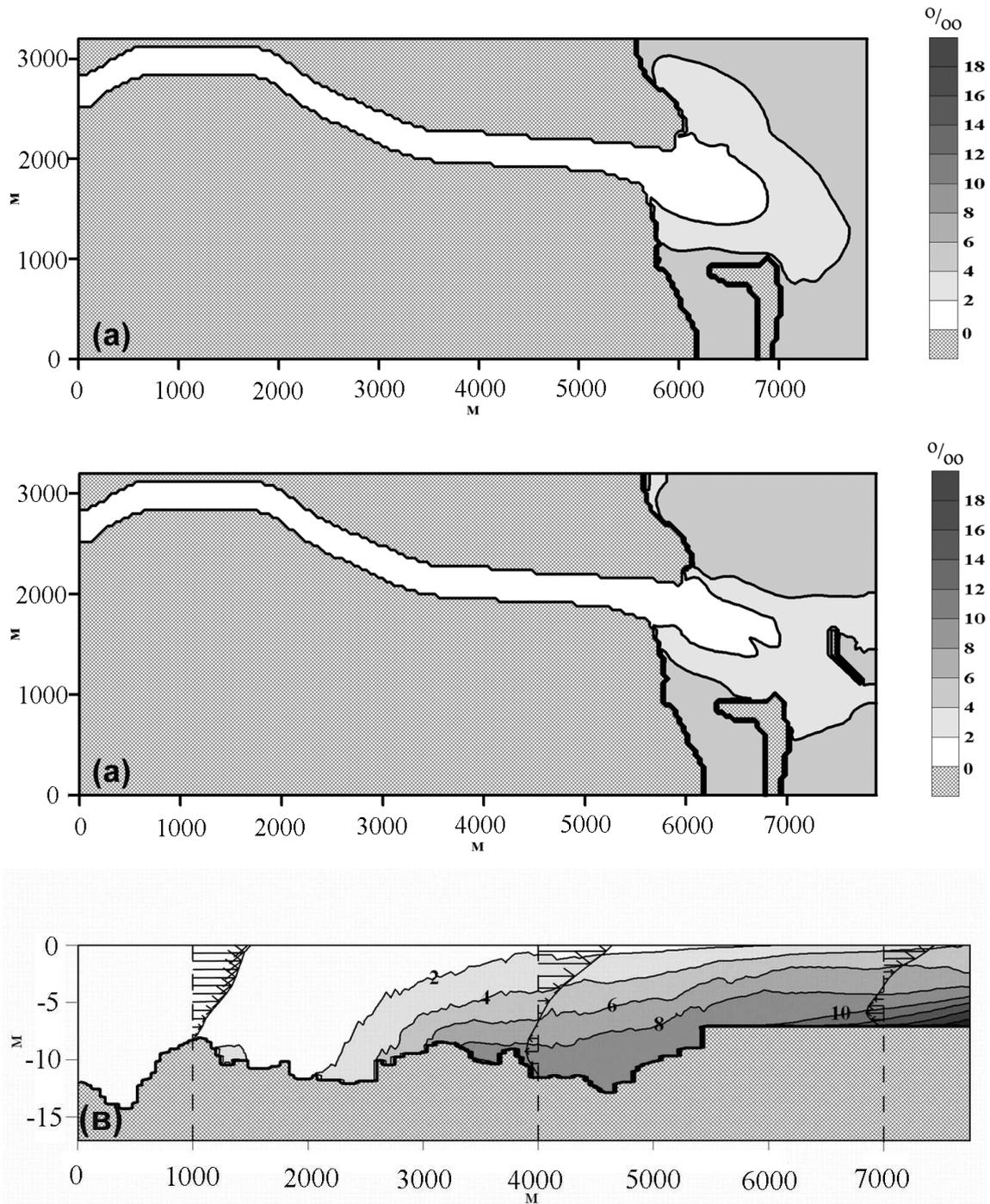


Рис. 5. Распределение солености на поверхности (а), на дне (б) и вертикальный разрез поля солености (в) для сценария 2

что при экстремально низких расходах в рукаве Быстрый соленый клин проникал в устье рукава и при наличии бара. При наличии прорези в баре соленый клин проникает на расстояние 4–5 км. Даже консервативная оценка с помощью гидрав-

лической модели в отсутствие вовлечения и при постоянной глубине не предсказывает выход соленого клина за пределы рукава. Сложный рельеф дна Быстрого уменьшает дальность проникновения соленой воды в рукав по сравнению с случа-

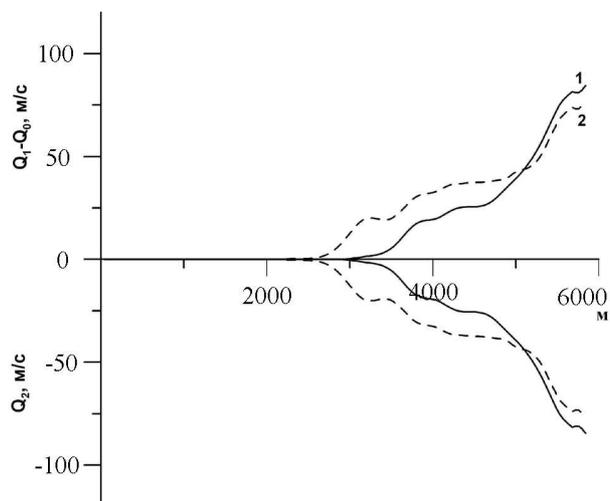


Рис. 6. Расход воды в нижнем слое  $Q_2$  и соответствующее приращение  $Q_1 - Q_0$  расхода в верхнем слое

ем прямого канала и при этом возможно формирование долгоживущих областей соленых вод между порогами (см. рис. 5). Заметим, что полученные здесь оценки неплохо согласуются с эмпирическими оценками [1]. Естественно, что расстояние, на которое проникает соленая вода, может существенно превышать указанную выше цифру при наличии эпизодических нагонных явлений [1]. Поэтому необходимо проведение специального исследования этих явлений в рамках трехмерной модели.

1. Михайлов В.Н. (ред.) Гидрология дельты Дуная.– М.: ГЕОС, 2004.– 448 с.
2. Кошебуцкий В., Мадерич В., Нестеров А., Хеллинг Р. Моделирование распространения тепла во внутренних водах и прибрежных областях морей // Прикладная гидромеханика.– 2004.– 6.– С. 205-230.
3. Stommel H., Farmer H.G. Abrupt change in width in two-layer open channel flow // J. Marine. Research.– 1953.– 7.– P. 205-230.
4. Schijf J.B., Schonfeld J.C. Theoretical considerations on the motion of salt and and fresh water // Proc. Minnesota Int. Hydr. Conf. ASCE and IAHR.– , 1953.– P. 321-330.
5. Кейлеган Д.Г. Механизм образования неподвижного клина соленой воды // Гидродинамика береговой зоны и эстуариев.– Под ред. А.Т. Иппена, Л. Гидрометеиздат.– С. 1970.394
6. Arita M., Jirka G.H. Two-layer model of saline wedge. I. Entrainment and interfacial friction // J. Hydr. Eng.– 1986.– 113.– P. 1229-1248.
7. Arita M., Jirka G.H. Two-layer model of saline wedge. II. Prediction of mean properties // J. Hydr. Eng.– 1986.– 113.– P. 1249-1263.
8. Maderich V. Two-layer exchange flows through long straits with sill. // Oceanic fronts and Related Phenomena. Konstantin Fedorov Int. Memorial Symp.– IOC Workshop Rep. Series, N 159, UNESCO'2000, 2000.– P. 326-331.
9. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation // Three-Dimensional Coastal Ocean Models.– 1987, N. Heaps (ed), Washington, D.C., Am. Geoph. Union.– P. 1-16.