

Особенности формирования речного плюма в мелководной лагуне (на примере залива Сиваш, Азовское море)

В. В. Фомин, А. А. Полозок *

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: polozok.umi@gmail.com*

Аннотация

Особенности термохалинной структуры вод лагун и заливов оказывают значительное влияние на биологическое разнообразие, продуктивность и качество вод этих акваторий. В работе исследуются характеристики пресноводного плюма в районе впадения реки Салгир в залив Сиваш. Исследование выполнено на основе трехмерной гидродинамической модели типа *ROM* с разрешением 10 м по горизонтали и 0.1 м по вертикали. В качестве входных параметров модели использованы данные натурных наблюдений за речным стоком, температурой и соленостью речной и морской воды, выполненных в районе устья реки Салгир в июне 2021 г. На основе серии численных экспериментов изучено влияние различного типа течений на положение, форму и размеры плюма. Показано, что под воздействием речного стока на выходе из устья реки формируется плюм диаметром (горизонтальным размером) несколько сотен метров. Из-за вращения Земли форма плюма асимметричная. Эта асимметрия проявляется независимо от того, существуют ли в бассейне течения. Вдольбереговые течения вызывают уменьшение поперечного размера плюма в два раза. Когда ветер направлен в сторону берега, происходит запираание плюма и пресная вода растекается узкой полосой по обе стороны от устья реки. Плюм сосредоточен в верхнем слое толщиной 20–40 см. В непосредственной близости от устья реки толщина плюма наименьшая, что обусловлено подъемом к поверхности бассейна пресной воды, поступающей из придонных слоев реки.

Ключевые слова: Азовское море, Крым, Салгир, Сиваш, речной сток, речной плюм, математическое моделирование

Благодарности: исследование выполнялось в рамках темы Морского гидрофизического института РАН № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования». Модельные расчеты проводились на вычислительном кластере МГИ.

Для цитирования: Фомин В. В., Полозок А. А. Особенности формирования речного плюма в мелководной лагуне (на примере залива Сиваш, Азовское море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 28–42. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-28-42

© Фомин В. В., Полозок А. А., 2022



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Features of River Plume Formation in a Shallow Lagoon (the Case of the Sivash Bay, the Sea of Azov)

V. V. Fomin, A. A. Polozok *

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: polozok.umi@gmail.com*

Abstract

Features of the thermohaline structure of the waters of lagoons and bays have a significant impact on the biological diversity, productivity and quality of the waters of these areas. In this paper, the characteristics of a freshwater plume in the area of the Salgir River outlet into the Sivash Bay are studied. The study was performed on the basis of a three-dimensional hydrodynamic model with 10 m horizontal resolution and 0.1 m vertical one. Data from field observations of river runoff, temperature and salinity of river and sea water, which were carried out in the area of the mouth of the Salgir River in June 2021, were used as input parameters of the model. Based on a series of numerical experiments, the influence of various types of currents on the position, shape and size of the plume was studied. It is shown that under the influence of river runoff a plume several hundred meters in size is formed at the debouchment from the river mouth. Due to the rotation of the Earth, the shape of the plume is asymmetric. This asymmetry appears regardless of the presence of any currents in the basin. Alongshore currents cause a decrease in the transverse size of the plume by a factor of two. When the wind is directed towards the shore, the plume is blocked, and fresh water spreads in a narrow strip on both sides of the river mouth. The plume is concentrated in the upper layer 20–40 cm thick. The thickness of the plume shows the smallest value in the immediate vicinity of the river mouth due to the rise of fresh water coming from the bottom layers of the river to the surface of the basin.

Keywords: Sea of Azov, Crimea, Salgir, Sivash, fresh runoff, plume, mathematical modeling

Acknowledgments: the study was carried out within the theme of the Marine Hydrophysical Institute of RAS No. 0555-2021-0005 «Coastal Research». Model calculations were carried out on the MHI computing cluster.

For citation: Fomin, V.V. and Polozok, A.A., 2022. Features of River Plume Formation in a Shallow Lagoon (the Case of the Sivash Bay, the Sea of Azov). *Ecological Safety of the Coastal and Shelf Zones of the Sea*, (3), pp. 28–42. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-28-42

Введение

Залив Сиваш представляет собой мелководную лагуну, отделенную от Азовского моря Арабатской Стрелкой – вытянутой в меридиональном направлении песчаной косой (рис. 1). Водообмен между заливом и морем происходит через пролив Тонкий. Оценки составляющих водно-солевого баланса залива Сиваш, таких как атмосферные осадки, испарение и водообмен, получены в ряде работ [1–5]. Тем не менее остается недостаточно изученной составляющая водного баланса, связанная с поверхностным стоком – поступлением в залив вод из рек Крымского п-ова, особенно в период паводков. Среди этих рек наиболее крупной водной артерией является р. Салгир, которая дает около 70 % речного стока в зал. Сиваш [1]. В районе впадения р. Салгир в зал. Сиваш возможно образование плюма.



Рис. 1. Расположение зал. Сиваш и устья р. Салгир (выделенная прямоугольная область)

Fig. 1. Location of the Sivash Bay and the Salgir River mouth (selected rectangular area)

Плюмы представляют собой линзы распресненных вод, которые формируются в устьевых областях рек [6–11]. Пока сохраняется приток пресных вод, плюм существует постоянно, однако на его положение, форму и размеры могут влиять течения различного происхождения, в первую очередь ветровые течения.

Структура плюма в районе устья р. Салгир почти не изучена. Севастопольским отделением ГОИН 24 июня 2021 г. была выполнена площадная съемка температуры и солености воды в районе устья р. Салгир (данные съемки были любезно предоставлены Н. Н. Дьяковым). В поле солености удалось выделить плюм (рис. 2). Оценка горизонтальной протяженности плюма по изогалине ~ 55 ‰ показала, что он имеет размер ~ 75 – 100 м. С правой стороны от устья реки плюм несколько вытянут в юго-восточном направлении, что указывает на наличие здесь вдольберегового потока. Температура воды в реке и заливе была почти одинаковой.

Результаты этой съемки послужили мотивацией проведения настоящей работы, в задачи которой входило исследование общих характеристик плюма

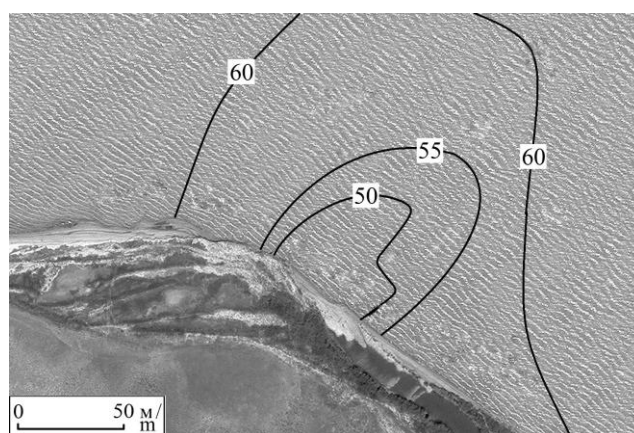


Рис. 2. Поверхностное распределение солености воды (‰) в районе устья р. Салгир по данным измерений 24 июня 2021 г.

Fig. 2. Surface distribution of water salinity (‰) in the area of the mouth of the Salgir River according to measurements dated June 24, 2021

плюма в районе устья р. Салгир на основе математического моделирования. Представляется, что результаты модельных расчетов помогут более обоснованно подходить к планированию дальнейших натурных исследований речных плюмов в зал. Сиваш и других регионах.

При моделировании плюма использовались следующие параметры:

$$Q_p = 0.81 \text{ м}^3/\text{с}; \quad T_0 = 27.5 \text{ }^\circ\text{C}; \quad S_0 = 60 \text{ ‰}; \quad T_p = T_0; \quad S_p = 0,$$

где Q_p , T_0 , S_0 – расход воды р. Салгир, фоновые распределения температуры и солености воды в исследуемом районе зал. Сиваш; T_p , S_p – температура и соленость речной воды. Средняя скорость втекающей речной воды u_p определялась по расходу воды и площади поперечного сечения замыкающего створа реки. Согласно заданным параметрам, температура воды в реке и в заливе одинакова. Поэтому формирование плюма обусловлено разностью соленостей втекающей речной воды и воды залива.

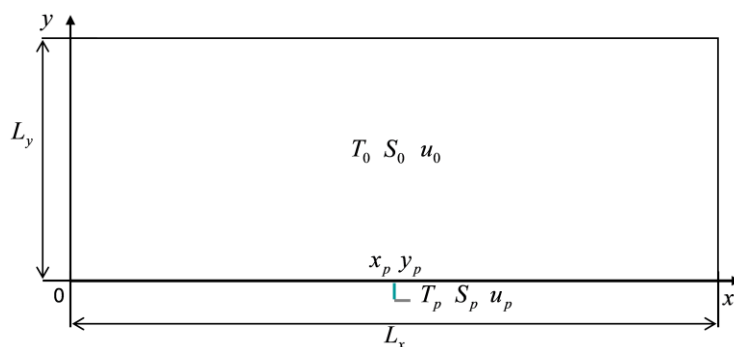
Математическая модель плюма

Рассматривается мелководный бассейн размером $L_x \times L_y$, ограниченный свободной поверхностью, с ровным дном (рис. 3). Ось x направлена на восток, а ось y – на север. Область имеет твердую боковую границу: $y = 0$. В зависимости от контекста рассматриваемых задач остальные три границы могут быть открытыми (жидкими) или твердыми. В начальный момент времени ($t = 0$)

$$u = u_0, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad T = T_0, \quad S = S_0,$$

где u , v , w – компоненты скорости течения вдоль осей x , y , z соответственно; T , S – температура и соленость воды; u_0 – скорость вдольберегового фонового течения.

При $t > 0$ в точке (x_p, y_p) начинает действовать локальный источник массы, моделирующий речной сток. Ставится задача исследования эволюции полей T и S при заданных значениях параметров.



Р и с . 3 . Расчетная область и входные параметры модели. Серым цветом показан фрагмент русла реки

Fig. 3. Computational domain and input parameters of the model. A fragment of the riverbed is shown in gray

В настоящей работе использовалась численная модель [12, 13]. Модель основана на трехмерных σ -координатных уравнениях динамики океана в приближении Буссинеска и гидростатики следующего вида (члены уравнений с повторяющимися индексами α и β суммируются от 1 до 2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(Du_\alpha) + \Lambda u_\alpha + \varepsilon_{\alpha\beta} f D u_\beta + g D \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} + D B_\alpha &= \frac{\partial}{\partial x_\beta} (D \tau_{\alpha\beta}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \sigma} \right), \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} (D u_\alpha) + \frac{\partial w^*}{\partial \sigma} &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} (DT) + \Lambda T &= \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(A_T \frac{\partial T}{\partial x_\beta} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_T}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right), \\ \frac{\partial}{\partial t} (DS) + \Lambda S &= \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(A_S \frac{\partial S}{\partial x_\beta} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_S}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right), \\ \rho &= \rho(T, S), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Lambda \varphi &= \frac{\partial}{\partial x_\beta} (D u_\beta \varphi) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (w^* \varphi), \quad B_\alpha = \frac{g}{\rho_0} \left(\frac{\partial}{\partial x_\alpha} D \int_\sigma^0 \rho d\sigma' + \sigma \frac{\partial D}{\partial x_\alpha} \rho \right), \\ \tau_{\alpha\alpha} &= 2A_M \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\alpha}, \quad \tau_{\alpha\beta} = \tau_{\beta\alpha} = A_M \left(\frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} + \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} \right), \end{aligned}$$

где $(x_1, x_2) = (x, y)$; σ – безразмерная вертикальная координата, изменяющаяся в пределах от -1 до 0 ; $(u_1, u_2) = (u, v)$ – горизонтальные компоненты скорости течения; $D = h_0 + \eta$; h_0 – глубина бассейна; η – координата свободной поверхности; w^* – нормальная к поверхностям $\sigma = \text{const}$ компонента скорости течения (при постоянном значении h_0 величина $w^* = w$); f – параметр Кориолиса; $\varepsilon_{\alpha\beta}$ – символ Кронекера; $\tau_{\alpha\beta}$ – компоненты тензора турбулентных напряжений; $A_M, K_M, A_T, K_T, A_S, K_S, K_C$ – коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность морской воды; ρ_0 – средняя плотность воды.

На свободной поверхности ($\sigma = 0$) граничные условия имеют вид

$$w^* = 0, \quad \frac{K_M}{D} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \sigma} = c_a |u| u_\alpha, \quad \frac{K_T}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{K_S}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma}$$

Граничные условия на дне записываются следующим образом:

$$w^* = 0, \quad \frac{K_M}{D} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \sigma} = c_b |u| u_\alpha, \quad \frac{K_T}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{K_S}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} = 0,$$

где c_a, c_b – коэффициенты трения; $|u| = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$.

На твердых меридиональных стенках ($x_1 = 0$; $x_1 = L_x$) задаются условия

$$u_1 = 0, \quad u_2 = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial x_1} = 0.$$

На твердых зональных стенках ($x_2 = 0$; $x_2 = L_y$) задаются условия

$$u_2 = 0, \quad u_1 = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial x_2} = 0. \quad (2)$$

Постановка граничных условий на жидких участках обсуждается ниже.

Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости A_M вычислялся по формуле Смагоринского [14]. Коэффициенты горизонтальной турбулентной диффузии тепла, солей принимались равными $0.5 A_M$. Уравнение состояния морской воды (1) задавалось формулой *UNESCO*, широко используемой при моделировании динамики морских вод. Следует отметить, что зал. Сиваш является гиперсоленным водоемом. Выбор уравнения состояния для таких водоемов является отдельной проблемой, выходящей за рамки данной работы. Отметим, что для зал. Сиваш данная проблема пока не решена.

В задачах с фоновым течением u_0 коэффициенты вертикального обмена были постоянными: $K_M = \bar{K}_M$; $K_S = K_T = \bar{K}_S$, где $\bar{K}_M = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $\bar{K}_S = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. В задачах с ветровым течением K_M и K_S определялись на основе теории Мейлора – Ямады [15].

Численный алгоритм модели основан на разделении задачи на баротропную и бароклинную моды и применении явных схем по горизонтальным координатам и неявных схем по σ -координате. Адвективный оператор Λ в уравнениях модели аппроксимируется TVD-схемами [16], обеспечивающими монотонность численного решения, что необходимо для правильного описания полей с большими пространственными градиентами.

В численных экспериментах расчетная область имела следующие размеры (рис. 3): $L_x = 4000 \text{ м}$; $L_y = 1500 \text{ м}$; $h_0 = 1.5 \text{ м}$. Координаты русла реки: $x_p = 2000 \text{ м}$, $y_p = 50 \text{ м}$. По горизонтали использовалась прямоугольная расчетная сетка с шагом $\Delta x = 10 \text{ м}$. По вертикальной координате количество расчетных уровней $n = 16$. Это значение n было выбрано на основе предварительных расчетов для удовлетворительного разрешения вертикальной структуры плюма, сосредоточенного в верхнем полуметровом слое.

Для учета в модели источника пресных вод расчетная область дополнялась L -образным фрагментом русла реки (см. рис. 3), состоящим из четырех ячеек по вертикали и по горизонтали. При $t = 0$ в этом фрагменте русла $S = S_0$. Значения параметров T_p , S_p и u_p задавались в крайней правой ячейке. Средняя скорость втекания речной воды в залив $u_p = Q_p / (\Delta x h_p) = 0.16 \text{ м/с}$, где $h_p = 0.5 \text{ м}$ – глубина русла реки. Таким образом, вследствие перемещения источника вверх по потоку в русле реки происходит частичное смешение пресной и соленой воды. Это уменьшает горизонтальные градиенты солености в замыкающем створе реки и, таким образом, снижает вероятность возникновения здесь гидродинамической неустойчивости. Подобные способы задания источника пресных вод применялись в работах [6, 10, 16] при моделировании речных плюмов.

При $u_0 = 0$ на жидких границах расчетной области ставилось условие гладкого продолжения, предполагающее равенство нулю нормальной производной от искомой прогностической переменной. Как показывает практика, на небольших промежутках интегрирования по времени такой набор условий на открытых границах работает вполне удовлетворительно.

Результаты расчетов и обсуждение

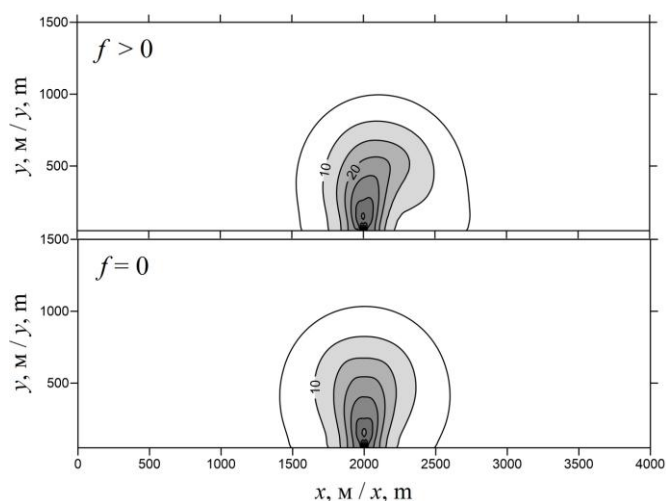
Предложенная выше конфигурация численной модели дала возможность исследовать начальную фазу формирования пресноводного плюма в районе устья р. Салгир. Интегрирование проводилось на период времени 6–8 ч с шагом $\Delta t = 4$ с. Во всех расчетах за первый час модельного времени расход воды в источнике линейно увеличивался от 0 до Q_p и далее оставался неизменным.

Основным объектом анализа являлась относительная соленость воды

$$C = (1 - S/S_0) \cdot 100 \% . \quad (3)$$

Эта величина характеризует степень разбавления соленой воды залива речной водой, т. е. C показывает, на сколько процентов S в конкретной точке залива меньше S_0 . Из формулы (3) следует, что $C = 0$ при $S = S_0$ и $C = 100\%$ при $S = 0$. Границы плюма определялись по положению изолинии $C = 10\%$, что примерно соответствует изогалине 55‰ в натурном эксперименте (см. рис. 2).

1. *Влияние силы Кориолиса.* При $u_0 = 0$ было выполнено два численных эксперимента – с учетом и без учета силы Кориолиса ($f > 0$ и $f = 0$). Соответствующие поля C на верхнем горизонте показаны на рис. 4. Здесь и на других рисунках изолинии C даны с шагом 5%. Первая изолиния соответствует $C = 5\%$ (57‰). Как видно, под воздействием речного стока на выходе из устья реки формируется плюм в виде области пониженной солености, вытянутой



Р и с . 4 . Поле $C(x, y, 0, t)$ при $t = 8$ ч с учетом ($f > 0$) и без учета ($f = 0$) силы Кориолиса

F i g . 4 . Field $C(x, y, 0, t)$ at $t = 8$ h with ($f > 0$) and without ($f = 0$) the Coriolis force

в сторону залива. Со временем плюм растекается во всех направлениях и увеличивается в размерах. При $f > 0$ плюм имеет тенденцию к смещению в правую сторону от источника. При $f = 0$ форма плюма симметрична относительно положения источника (прямой $x = x_p$).

Отметим, что эффект влияния вращения Земли на плюмы известен в литературе [6, 10, 11, 16]. При выходе из устья поток пресных вод под воздействием силы Кориолиса поворачивает вправо в Северном полушарии ($f > 0$). В нашем случае примечательным является тот факт, что даже для такого небольшого плюма влияние силы Кориолиса оказывается заметным. Этот эффект действует постоянно и в чистом виде может отчетливо проследиваться в маловетренную погоду.

2. Влияние вдольберегового течения. Рассмотрим влияние направления и скорости вдольберегового течения u_0 на положение, форму и размер плюма. Для упрощения задачи вдольбереговое течение считаем постоянным по глубине и не меняющимся по времени. В данном случае природа течения не является принципиальной. Учитывая направление воздействия силы Кориолиса на плюм, вдольбереговое течение при $u_0 > 0$ будем называть попутным (направленным вправо от устья), а вдольбереговое течение при $u_0 < 0$ – встречным (направленным влево от устья).

В левой части рис. 5 показаны поля солёности на поверхности бассейна для трех значений скорости попутного течения: $u_0 = a_1$; $u_0 = a_2$; $u_0 = a_3$, где

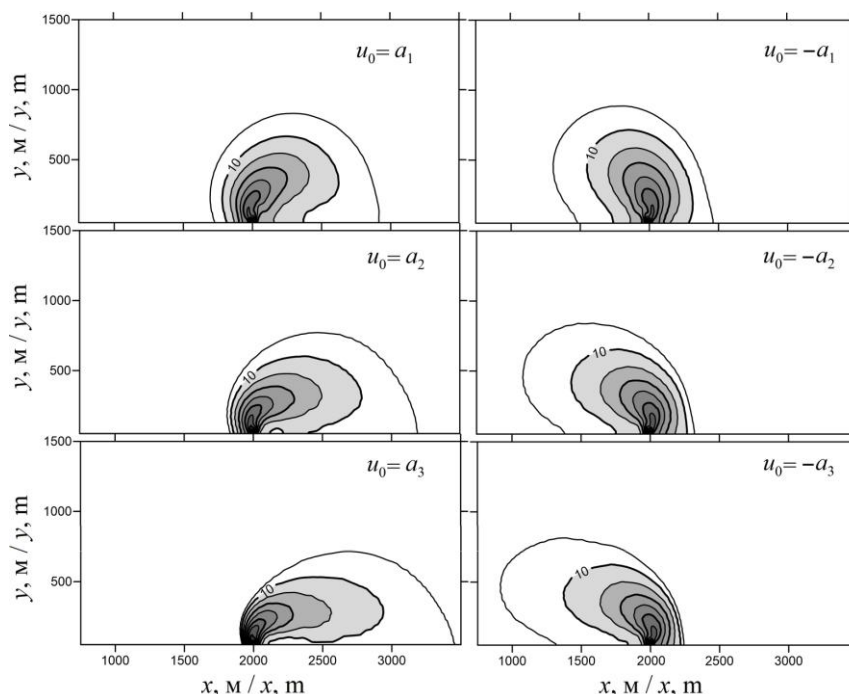


Рис. 5. Поле $C(x, y, 0, t)$ при $t = 6$ ч для различных значений скорости u_0 попутного (слева) и встречного (справа) течения

Fig. 5. Field $C(x, y, 0, t)$ at $t = 6$ h for different velocities u_0 of the associated (left) and counter (right) current

константы a_i зависят от средней скорости течения в створе реки u_p : $a_1 = u_p/6, a_2 = u_p/3$ и $a_3 = u_p/2$. Как видно, попутное течение вызывает деформации плюма, выражающиеся в его сжатии в поперечном направлении и растяжении в продольном. При этом плюм смещается вниз по потоку. Все эти деформации отчетливо прослеживаются по конфигурации изолиний $C \geq 10 \%$.

Результаты расчетов поля C для разных значений скорости встречного течения приведены на рис. 5, *справа*. На встречном течении поведение плюма несколько отличается. Плюм также смещается по направлению течения (влево), но его прижатие к берегу менее заметно по сравнению со случаем попутного течения. Таким образом, влияние силы Кориолиса на характеристики плюма при вдольбереговых течениях проявляется по-разному – при попутном течении плюм более прижат к берегу и более вытянут в направлении потока.

Вертикальная структура поля C в сечении $x = x_p$ для трех значений u_0 показана на рис. 6. Плюм сосредоточен в очень тонком поверхностном слое толщиной 15–20 см. Учет фонового течения приводит к уменьшению протяженности плюма по координате y и его прижатию к берегу, что наиболее заметно при попутном течении ($u_0 = a_3$).

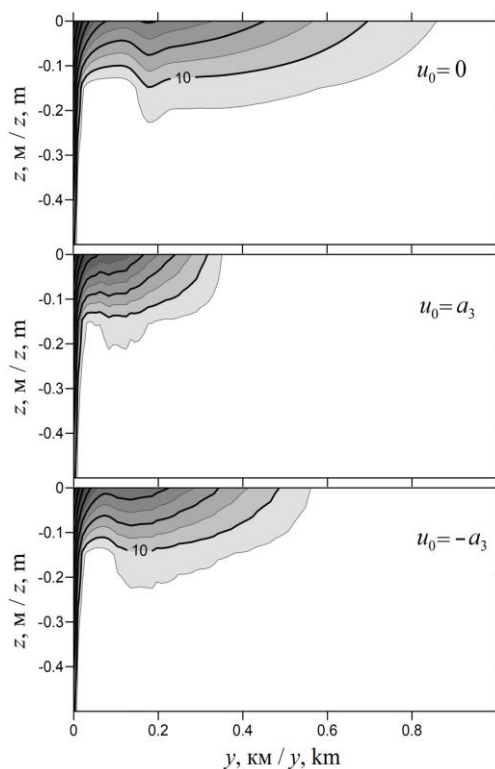


Рис. 6. Поле $C(x_p, y, z, t)$ при $t = 6$ ч для разных значений u_0

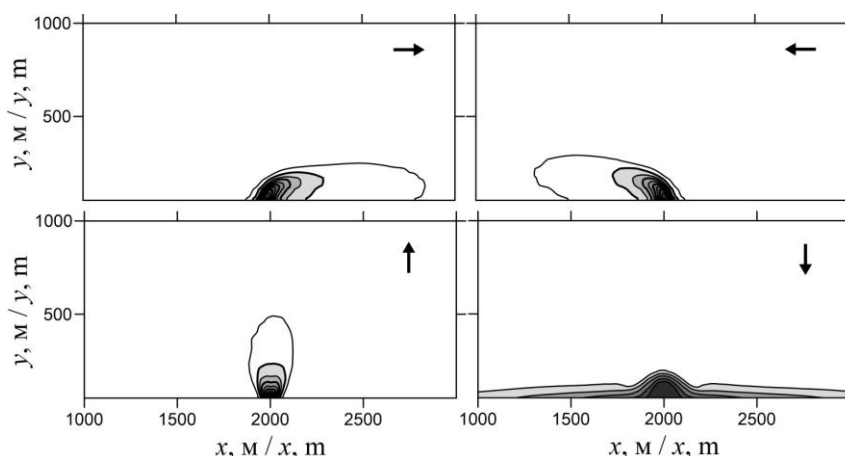
Fig. 6. Field $C(x_p, y, z, t)$ at $t = 6$ h for different values of u_0

Обращает на себя внимание уменьшение толщины плюма в области, непосредственно примыкающей к устью реки, что обусловлено эффектом плавучести – подъемом (всплытием) к поверхности бассейна пресной воды, поступающей в бассейн из придонных слоев реки.

3. *Влияние ветровых течений.* Представляет интерес рассмотреть влияние на конфигурацию плюма ветровых течений разных направлений. Для упрощения расчетов бассейн считался замкнутым. Коэффициенты вертикального обмена определялись по модели Мейлора – Ямады, причем константы \bar{K}_M и \bar{K}_S использовались в качестве их минимальных значений. В процессе интегрирования скорость ветра умножалась на коэффициент, который за первый час модельного времени линейно увеличивался от 0 до 1 и далее оставался неизменным.

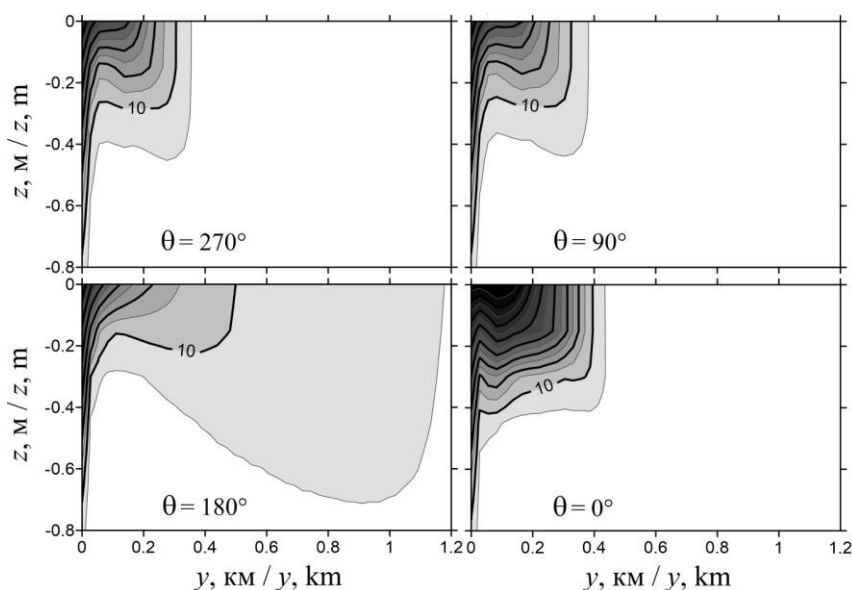
На рис. 7 показано распределение C на поверхности модельного бассейна для четырех направлений ветра при $t = 8$ ч. Скорость ветра $W = 7.5$ м/с. Видно, что при вдольбереговом направлении ветра конфигурация плюма качественно совпадает с вариантами расчетов для вдольберегового фоновых течения. В частности, проявляется асимметрия формы плюма, связанная с влиянием силы Кориолиса. При ветре от берега плюм вытягивается в форме овала внутрь залива. Когда ветер направлен в сторону берега, происходит запирание плюма и пресная вода растекается узкой полосой по обе стороны от устья реки.

На рис. 8 приведено вертикальное сечение поля C при $x = x_p$ для направлений ветра, показанных на рис. 7. Наибольшая толщина плюма соответствует ветру, направленному в сторону берега ($\theta = 0^\circ$). При этом нижняя граница плюма $C = 10\%$ достигает глубины 0.4 м. Когда ветер направлен от берега ($\theta = 270^\circ$), плюм существенно размывается и его граница отступает от берега на 1.2 км.



Р и с . 7 . Поле $C(x, y, 0, t)$ при $t = 8$ ч для четырех направлений ветра при $W = 7.5$ м/с. Стрелками показано направление действия ветра

Fig. 7. Field $C(x, y, 0, t)$ at $t = 8$ h for four wind directions at $W = 7.5$ m/s. The arrows show the direction of the wind



Р и с . 8 . Поле $C(x_p, y, z, t)$ при $t = 8$ ч для разных направлений ветра θ (270° – запад; 90° – восток; 180° – юг; 0° – север) при $W = 7.5$ м/с

Fig . 8 . Field $C(x_p, y, z, t)$ at $t = 8$ h for different wind directions θ at $W = 7.5$ m/s (270° – West; 90° – East; 180° – South; 0° – North)

В заключительном численном эксперименте задавался нестационарный ветер вида

$$W_x = W_0 \cos \omega t, \quad W_y = W_0 \sin \omega t, \quad (4)$$

где $W_0 = 7.5$ м/с; $\omega = 2\pi/T_w$; $T_w = 8$ ч. Цель эксперимента – показать, как плюм реагирует на изменение направления ветра.

Результаты расчетов поля солёности на поверхности бассейна с интервалом в 2 ч даны на рис. 9. Согласно формулам (4), за период времени T_w вектор скорости ветра делает полный оборот против часовой стрелки.

Постоянное изменение направления ветра приводит к постоянному изменению конфигурации плюма. При $0 < t < 4$ ч ветер направлен от берега в сторону залива и плюм локализован вблизи устья реки. При $t > 4$ ч ветер направлен в сторону берега. При этом возникают вдольбереговые течения, которые растягивают и перемещают плюм вдоль берега в западном, а затем и в восточном направлениях.

На рис. 10 приведены вертикальные сечения поля C при $x = x_p$ для моментов времени, показанных на рис. 9. Как видно, протяженность плюма по горизонтали примерно одинакова (200–300 м). Когда ветер направлен в сторону берега, нижняя граница плюма заглубляется на 15–20 см.

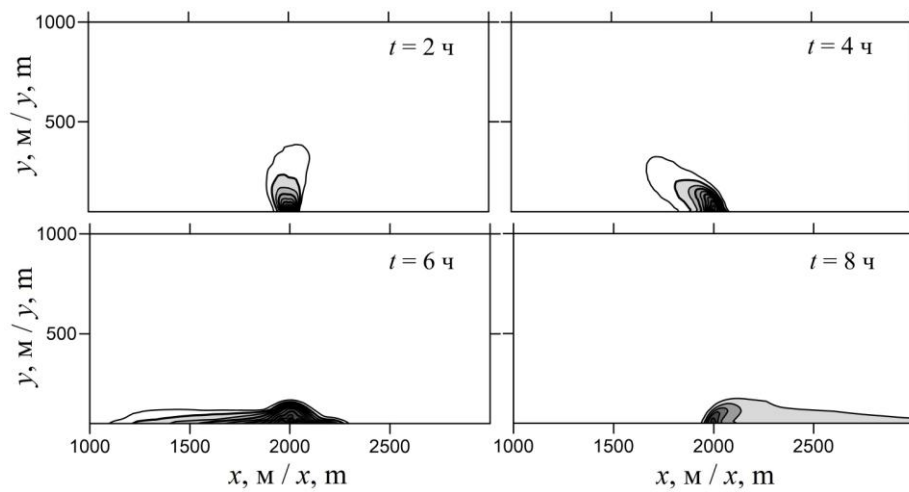


Рис. 9. Поле $C(x, y, 0, t)$ при нестационарном ветре вида (2) для четырех моментов времени

Fig. 9. Field $C(x, y, 0, t)$ with unsteady wind of the form (2) for four time stations

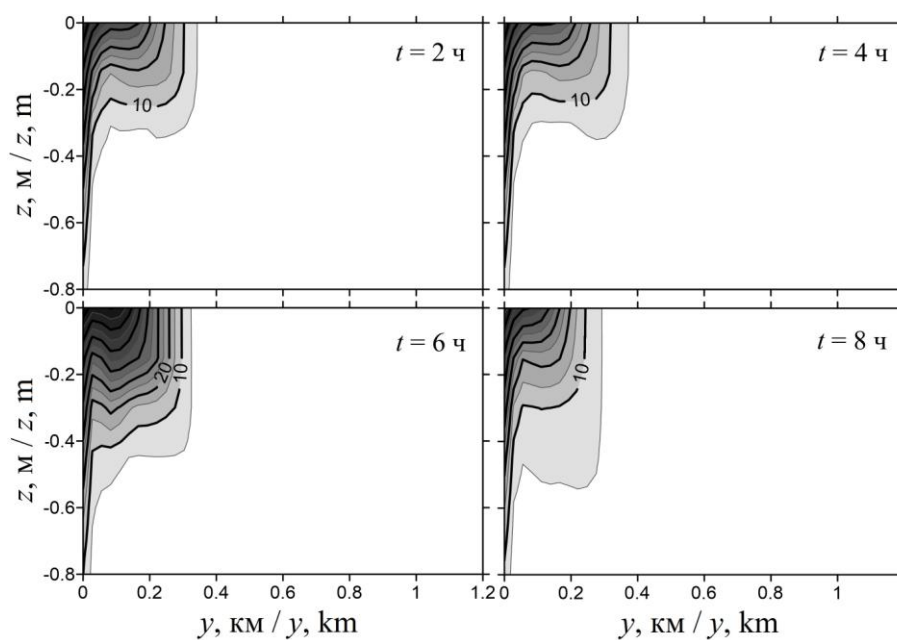


Рис. 10. Поле $C(x_p, y, z, t)$ при нестационарном ветре вида (2) для четырех моментов времени

Fig. 10. Field $C(x_p, y, z, t)$ with unsteady wind of the form (2) for four time stations

Заключение

На основе анализа результатов численного моделирования поля солёности воды в районе устья р. Салгир сделаны следующие выводы.

Под воздействием речного стока на выходе из устья реки формируется плюм в виде области пониженной солёности, вытянутой в сторону залива. Со временем плюм растекается во всех направлениях и увеличивается в размерах. Без учета вращения Земли форма плюма симметрична относительно положения источника (устья реки). При учете вращения Земли плюм смещается в правую сторону от устья. Эта асимметрия формы плюма проявляется независимо от того, существуют ли в бассейне какие-либо течения.

При учете вращения Земли влияние направления вдольбереговых течений на форму плюма оказывается существенным. В случае попутного течения (направленного вправо от устья) плюм более вытянут и прижат к берегу по сравнению со случаем встречного течения (направленного влево от устья). При наличии попутных течений поперечный размер плюма уменьшается примерно в два раза. При ветре, направленном от берега, возникающие течения растягивают плюм в поперечном направлении. Когда ветер направлен в сторону берега, происходит запирание плюма и пресная вода растекается узкой полосой по обе стороны от устья реки.

Поле солёности воды имеет хорошо выраженную двухслойную структуру. Плюм сосредоточен в верхнем слое толщиной 15–40 см. В непосредственной близости от устья реки происходит уменьшение толщины верхнего слоя, что обусловлено эффектом плавучести – подъемом к поверхности бассейна пресной воды, поступающей из придонных слоев реки.

Полученные в работе результаты являются предварительными, поскольку в модели использовались упрощенная геометрия бассейна и самые простые поля течений. В дальнейшем планируется исследовать динамику плюма с учетом реальной батиметрии, реальных полей ветра и разными типами уравнения состояния морской воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяков Н. Н., Белогудов А. А. Водообмен залива Сиваш с Азовским морем через пролив Генический (Тонкий) // Труды Государственного океанографического института имени Н. Н. Зубова. М. : Артифекс, 2015. Вып. 216. С. 240–253.
2. Совга Е. Е., Еремина Е. С., Хмара Т. В. Водный баланс залива Сиваш в условиях изменчивости природно-климатических и антропогенных факторов // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 1. С. 71–81. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-71-81
3. Евстигнеев В. П., Ерёмина Е. С. Расчет количества осадков, выпадающих на поверхность залива Сиваш // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. Вып. 2. С. 19–29. doi:10.22449/2413-5577-2019-2-19-29
4. Еремина Е. С., Евстигнеев В. П. Межгодовая изменчивость водообмена между Азовским морем и заливом Сиваш через пролив Тонкий // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С. 532–544. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-532-544

5. *Ломакин П. Д.* Особенности полей океанологических величин в заливе Сиваш (Азовское море) // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 6. С. 696–709. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-696-709
6. *Fong D. A., Geyer W. R.* The alongshore transport of freshwater in a surface-trapped river plume // Journal of Physical Oceanography. 2002. Vol. 32, iss. 3. P. 957–972. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<0957:TATOFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<0957:TATOFI>2.0.CO;2)
7. *Yankovsky A. E., Lemeshko E. M., Ilyin Y. P.* The influence of shelfbreak forcing on the alongshelf penetration of the Danube buoyant water, Black Sea // Continental Shelf Research. 2004. Vol. 24, iss. 10. P. 1083–1098. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.007>
8. *Osadchiev A. A., Zavialov P. O.* Lagrangian model of a surface-advected river plume // Continental Shelf Research. 2013. Vol. 58. P. 96–106. doi:10.1016/j.csr.2013.03.010
9. *Osadchiev A., Korshenko E.* Small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions // Ocean Science. 2017. Vol. 13, iss. 3. P. 465–482. doi:10.5194/os-13-465-2017
10. *Фомин В. В., Полозок А. А., Фомина И. Н.* Моделирование циркуляции вод Азовского моря с учетом речного стока // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 16–28. doi:10.22449/0233-7584-2015-1-16-28
11. *Цыганова М. В., Лемешко Е. М., Рябцев Ю. Н.* Моделирование формирования гидрофронта в районе устья Дуная // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 3. С. 26–31.
12. *Иванов В. А., Фомин В. В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море – суша. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 363 с.
13. *Иванов В. А., Фомин В. В., Полозок А. А.* Распространение загрязненных вод из нестационарного подводного источника в стратифицированной среде при наличии вертикального сдвига скорости течений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 4. С. 4–13.
14. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91, iss. 3. P. 99–164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)
15. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Reviews of Geophysics. 1982. Vol. 20, iss. 4. P. 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>
16. *Фомин В. В.* Применение схем TVD для численного моделирования фронтальных зон солености в мелком море // Метеорология и гидрология. 2006. № 2. С. 59–68.

Поступила 02.02.2022 г.; одобрена после рецензирования 25.02.2022 г.; принята к публикации 08.07.2022 г.; опубликована 25.09.2022 г.

Об авторах:

Фомин Владимир Владимирович, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, fomin.dntmm@gmail.com

Полозок Антон Александрович, старший инженер-программист отдела вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0002-0825-8669**, polozok.umi@gmail.com

About the authors:

Vladimir V. Fomin, Head of Department of Computer Engineering and Mathematical Modeling, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, *fomin.dntmm@gmail.com*

Anton A. Polozok, Senior Engineer-Programmer of Department of Computational Technologies and Mathematical Modeling, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-0825-8669**, *polozok.umi@gmail.com*

Заявленный вклад авторов:

Фомин Владимир Владимирович – постановка задачи, проведение расчетов, анализ результатов моделирования и подготовка статьи

Полозок Антон Александрович – обработка модельных данных, подготовка статьи

Contribution of the authors:

Vladimir V. Fomin – statement of the problem, calculations, analysis of simulation results and preparation of the article

Anton A. Polozok – model data processing and preparation of the article

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.