

# Численное моделирование циркуляции вод в Геленджикской и Голубой бухтах

В.С. Архипкин, С.С. Щербак

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
119992 Москва, Ленинские горы, д. 1, ГСП-3  
E-mails: [victor.arkhipkin@gmail.com](mailto:victor.arkhipkin@gmail.com), [feba@list.ru](mailto:feba@list.ru)*

В данной работе описываются результаты численного моделирования циркуляции вод в прибрежных водах Черного моря с помощью баротропной стационарной модели. Расчеты течений производились при различных направлениях ветра, а также разных значениях коэффициентов вертикального турбулентного обмена и трения о дно. Результаты моделирования были сопоставлены с данными натуральных наблюдений за течениями, проводившихся в Голубой бухте в июне-июле 2005 года, а также с данными радиолокационных изображений поверхности исследуемых бухт.

## Введение

Повышенное внимание к изучению циркуляции вод прибрежных акваторий объясняется рядом как объективных, так и субъективных причин. К первым относится тот факт, что циркуляция вод прибрежной зоны по сравнению с открытыми акваториями океана сложнее и формируется под воздействием большего числа факторов [1, 2]. Наличие вторых связано с деятельностью человека. Так, для прибрежных акваторий характерна повышенная антропогенная нагрузка; возникновение ряда работ по моделированию циркуляции прибрежных вод был продиктовано началом нефтедобычи на шельфе [3]. С другой стороны, помимо концентрации различных отраслей народного хозяйства, морским побережьям принадлежит роль рекреационных территорий, что делает еще более важными оценки процессов перемешивания прибрежных вод, и, как следствие, их ассимиляционной емкости. К этой группе исследований относится и данная работа.

Методы изучения динамики прибрежных вод довольно разнообразны. Во-первых, это непосредственные наблюдения за течениями; они, в свою очередь, подразделяются по своему принципу на лагранжевы, осуществляемые при помощи поплавков, и эйлеровы, при которых скорость течений измеряется непосредственно при помощи различных измерителей течений [4]. Недостаток этой группы методов – трудо- и прибороемкость, отсутствие всеохватных измерений.

Во-вторых, это математическое моделирование. В этом случае при наличии данных о конфигурации берегов и топографии дна бассейна, а также плотности воды можно рассчитать поле течений на любом интересующем горизонте, равно как и интегральные характеристики циркуляции в бассейне при различных значениях скорости и направления ветра [2, 5]. Так, в данной работе приводятся результаты применения численной баротропной стационарной модели для акваторий Голубой (Рыбацкой) и Геленджикской бухт.

К третьей категории относятся дистанционные методы. При наличии на морской поверхности поверхностно-активных веществ естественного или антропогенного происхождения на радиолокационных изображениях появляются слики, которые прорисовывают картину поверхностных течений и, в частности, вихревых структур, характерных для прибрежных акваторий [6]. Так, радиолокационные изображения, полученные со спутников ENVISAT и ERS, являются «вихреразрешающими» для акваторий, масштабы которых соответствуют рассматриваемой в данной работе Геленджикской бухте.

## Исходные уравнения и численная реализация модели

Применим декартову систему координат, ось  $z$  которой направлена от невозмущенной поверхности  $z=0$  в глубь моря, ось  $x$  ориентирована на восток, ось  $y$  – на север. Исходные уравнения модели представляют собой уравнения движения жидкости в квазигеострофическом приближении, дополненные уравнениями неразрывности и гидростатики и принимаемые с учетом, что вклад нелинейных членов и горизонтального

турбулентного обмена в прибрежной циркуляции незначителен, а значение кинематического коэффициента вертикального турбулентного обмена постоянно по вертикали.

В связи с малостью отклонения уровня поверхности  $\zeta$  по сравнению с глубиной моря, динамические граничные условия зададим на невозмущенной поверхности  $z=\zeta(x,y)=0$ ;  $p_\zeta=p_a=const$

$$A_v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\tau_x}{\rho_0}; A_v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\tau_y}{\rho_0}; w = 0. \quad (1)$$

На дне  $z=H(x,y)$  задается условие трения о дно:

$$A_v \frac{\partial u}{\partial z} = -Ru_H; A_v \frac{\partial v}{\partial z} = -Rv_H. \quad (2)$$

Здесь приняты обозначения:  $u, v$  и  $w$  – проекции вектора скорости на оси  $x, y$  и  $z$ ;  $\tau_x$  и  $\tau_y$  – составляющие касательного напряжения ветра;  $p_a$  – атмосферное давление;  $R$  – коэффициент донного трения;  $A_v$  – коэффициент вертикального турбулентного обмена;  $\rho_0$  – средняя плотность воды;  $u_H$  и  $v_H$  – составляющие скорости течения у дна.

Аналитическое решение описанной задачи получено в виде:

$$\varphi = \frac{\tau}{\alpha} \left[ \frac{\alpha \cdot ch(\alpha(H-z)) + k \cdot sh(\alpha(H-z))}{\alpha \cdot sh(\alpha H) + k \cdot ch(\alpha H)} \right] + \frac{G}{\alpha^2} \left[ \frac{k \cdot ch(\alpha z)}{\alpha \cdot sh(\alpha H) + k \cdot ch(\alpha H)} - 1 \right], \quad (3)$$

$$\text{где } \varphi = u + iv, G = \frac{g}{A_v} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} + i \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right), \alpha = \sqrt{\frac{if}{A_v}}, k = \frac{R}{A_v},$$

$f$  – параметр Кориолиса,  $z$  – горизонт,  $H$  – глубина бассейна,  $\zeta$  – высота уровня поверхности,  $g$  – ускорение силы тяжести.

Градиенты уровня поверхности рассчитываются через значения составляющих  $U$  и  $V$  функции полных потоков:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = a_1 \tau_x + a_2 \tau_y + a_3 U + a_4 V; \frac{\partial \zeta}{\partial y} = -a_2 \tau_x + a_1 \tau_y - a_4 U + a_3 V, \quad (4)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  и  $a_4$  – некоторые коэффициенты, зависящие от глубины.

Подвергнув систему уравнений (4) перекрестному дифференцированию и введя некоторые обозначения, приходим к уравнению для вычисления искомым значений составляющих функции полных потоков:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + a(x,y) \frac{\partial \psi}{\partial x} + b(x,y) \frac{\partial \psi}{\partial y} = c(x,y), \quad (5)$$

где  $\psi$  – функция полных потоков,

$a(x,y)$  и  $b(x,y)$  – коэффициенты, представляющие собой некоторую комбинацию коэффициентов  $a_1, a_2, a_3$  и  $a_4$ ,

$c(x,y)$  – коэффициент, значение которого определяется взаимным влиянием поля ветра и рельефа дна.

Решения уравнения (5) находятся численно при помощи конечно-разностной схемы с применением метода верхней последовательной релаксации.

Более подробное описание модели можно найти в [7].

## Результаты моделирования

Расчеты циркуляции вод в Голубой и Геленджикской бухтах были произведены при различных направлениях и значениях скорости ветра, а также при разных значениях коэффициентов вертикального турбулентного обмена и трения о дно.

Близкие к наблюдаемым (около 3 см/с) значения скорости поверхностных течений были получены при скорости ветра 10 м/с. Поскольку данные автоматической метеостанции, установленной в Голубой бухте в период наблюдений, указали на преобладание север-северо-восточного (NNE) направления, в общем случае рассматривались результаты, полученные именно при этом направлении.

Было замечено, что при уменьшении коэффициента вертикального турбулентного обмена на порядок (от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  и от  $10^{-3}$  до  $10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с) значения скорости течений увеличиваются так же на порядок, в то время как изменение значения коэффициента донного трения практически не влияет на результаты моделирования.

Помимо количественных, отмечены также качественные отличия результатов при изменении значений коэффициентов. При значении коэффициента вертикального турбулентного обмена, равном  $10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с, картина осредненной циркуляции в Голубой бухте (рис. 1) несколько отличается от соответствующей картины, полученной при больших значениях коэффициента (рис. 2) большей выраженностью антициклонального вихря.

Для более наглядного представления изменения течений с глубиной для ряда узлов сетки были построены графики изменения вектора скорости с глубиной; расчеты производились для двух значений коэффициента вертикального турбулентного обмена:  $10^{-3}$  и  $10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с (рис. 3).

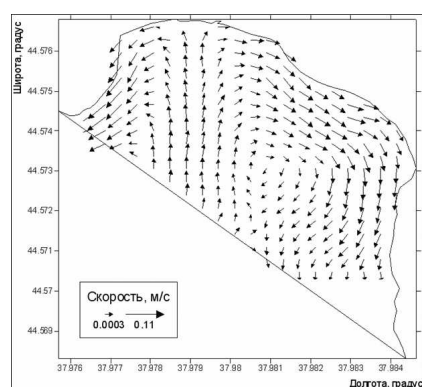


Рис. 1. Скорость осредненного по глубине течения в Голубой бухте при северо-северо-восточном ветре (м/с) ( $A_v=10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с)

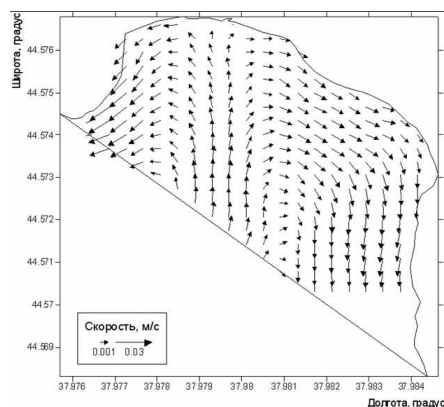


Рис. 2. Скорость осредненного по глубине течения в Голубой бухте при северо-северо-восточном ветре (м/с) ( $A_v=10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с)

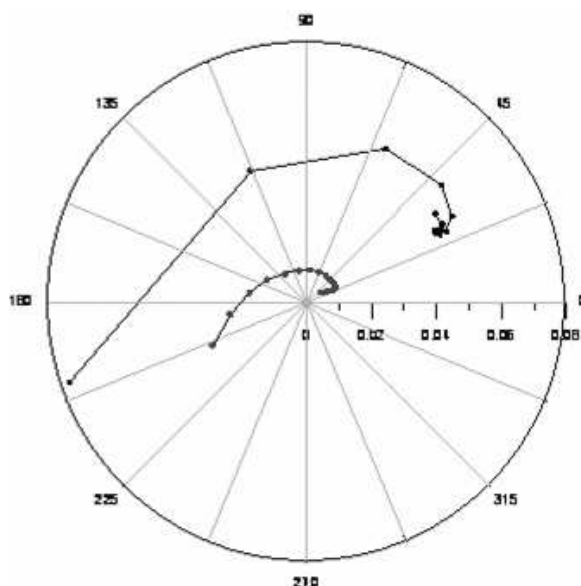


Рис. 3. График изменения вектора скорости с глубиной для одной из вертикалей в Геленджикской бухте при значениях вертикального турбулентного обмена, равных  $10^{-3}$  и  $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$

### Сравнение результатов моделирования с данными наблюдений

Натурные наблюдения за поверхностными течениями проводились при помощи дрейфующих буйков, местоположение которых с дискретностью 5 минут засекалось электронным тахеометром. Преобладающее в период наблюдений направление ветра определялось по данным автоматической метеостанции. Наблюдения были произведены 15.06.05 и 24.06.05; во время первого периода преобладал юго-западный ветер, во время второго - западный. Во время первой серии наблюдений два буйа из трех дрейфовали на юг, и только движение третьего буйа происходило в соответствии с результатами модели. Сопоставление результатов наблюдений 24.06.05 и моделирования демонстрируют соответственно рис. 4 и 5.

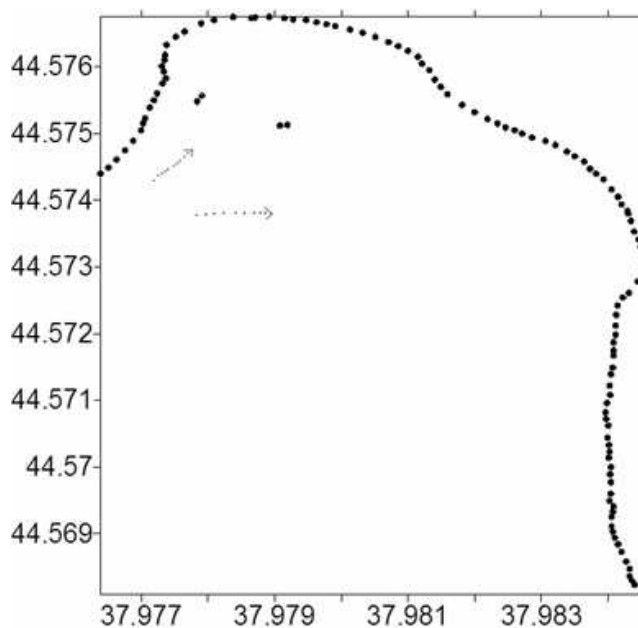


Рис. 4. Траектории буйев по наблюдениям 24.06.05

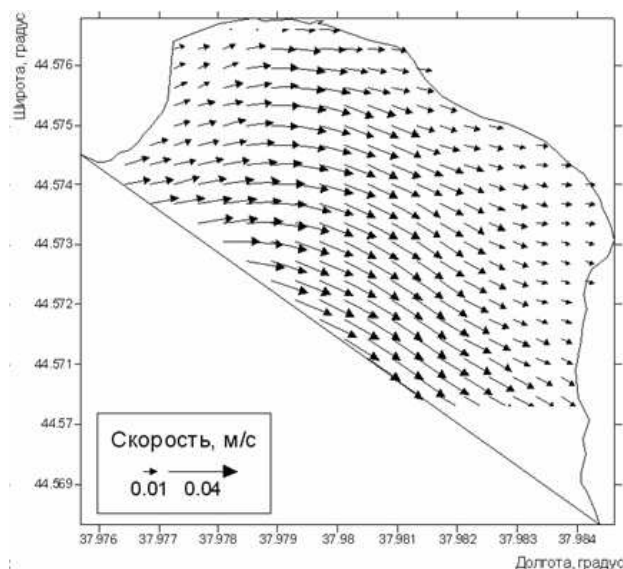


Рис. 5. Скорость поверхностных течений в Голубой бухте при западном ветре (м/с)

В отличие от поплавковых наблюдений, данные радиолокационного зондирования способны фиксировать процессы, происходящие не только на поверхности океана, но и внутри некоторого приповерхностного слоя. В этом нас убеждает сравнение вихревых структур, зафиксированных на снимках, с чертами осредненной циркуляции в Геленджикской бухте. На рис. 6 и 7 представлены соответственно радиолокационное изображение Геленджикской бухты, полученное 18.09.04, и схема осредненной циркуляции в Геленджикской бухте при южном ветре скоростью 5 м/с, характерного для момента, в который было получено изображение.



Рис. 6. Фрагмент радиолокационного изображения для акватории Геленджикской бухты (спутник ERS-2, 18.09.04)

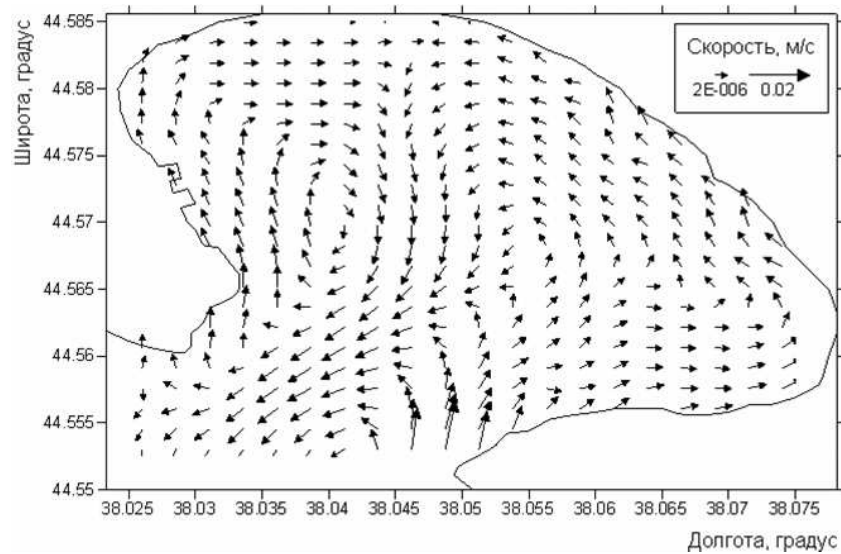


Рис. 7. Скорость осредненного по глубине течения в Геленджикской бухте при южном ветре (м/с)

### Заключение

Таким образом, при сравнении результатов моделирования с наблюдаемыми данными можно заметить, что при подборе соответствующих значений коэффициента вертикального турбулентного обмена и коэффициента донного трения данные модели адекватно отражают общую картину течений в рассматриваемой акватории. Однако не следует забывать, что примененная модель чрезвычайно упрощена. Пути усовершенствования модели лежат в рассмотрении нелинейных эффектов и эффектов перемешивания.

### Литература

1. Боуден К.Ф. Физическая океанография прибрежных вод // М.: Мир, 1988. 324 с.
2. Csanady G.T. Circulation in the coastal ocean // Dordrecht: D. Reidel publ. com., 1982. 279 pp.
3. Архипов Б.В., Попов С.К. Моделирование плотностных и ветровых течений в юго-восточной части Баренцева моря // Океанология, 1996. Т. 36. №6. С. 805-813.
4. Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В., Еремеев В.Н., Кременецкий В.В., Мотыжев С.В., Поярко С.Г., Пулейн П.М., Станичный С.В., Соловьев Д.М. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрефтерным данным // Океанология, 2004. Т. 44. №1. С. 34-38.
5. Булатов А.Е., Завьялов Д.Д. Вызванное ветром движение воды в мелководных замкнутых бассейнах // Морской гидрофизический журнал, 2004. №5. С. 35-44.
6. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Раев М.Д., Скворцов Е.И. Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне: Геленджик, 1999-2002 // М.: КДУ, 2003. 136 с.
7. Архипкин В.С. Особенности структуры и динамика прибрежного апвеллинга в Каспийском море // Каспийское море. Структура и динамика вод. М.: Наука, 1990. С. 61-74.