

## Пространственно-временная изменчивость инерционных течений в восточной части Черного моря в штормовой период

Н. А. Дианский<sup>1,2,3,\*</sup>, В. В. Фомин<sup>2</sup>, А. В. Григорьев<sup>2,4</sup>,  
А. В. Чаплыгин<sup>1</sup>, А. Г. Зацепин<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

<sup>5</sup>Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*E-mail: nikolay.diansky@gmail.com

Поступила в редакцию 21.10.2018 г., после доработки – 05.12.2018 г.

**Введение.** Представлен анализ результатов численных расчетов развития инерционных колебаний в штормовой период в восточной части Черного моря в сравнении с данными наблюдений и аналитическими решениями. Расчеты подтверждают значительный вклад инерционных движений в формирование полей скорости течений. Показано, что инерционные движения не оказывают влияния на изменение уровня моря, а их характер зависит от вертикальной структуры верхнего квазигомогенного слоя.

**Материалы и методы.** Приводится сопоставление результатов с натурными дрейферными наблюдениями в Черном море. Отмечено, что интенсивность инерционных движений в глубоководных областях моря значительно выше, чем в мелководных зонах, при этом вклад инерционных течений в общую циркуляцию Черного моря в глубоководной зоне сравним с вкладом мезомасштабных движений. Проведено исследование аналитического решения системы уравнений, описывающей инерционные колебания, с учетом ветрового воздействия и при его отсутствии.

**Анализ результатов.** Возбуждение инерционных движений вызывается резким изменением скорости ветра, причем гармонический характер амплитуды колебаний искажается с глубиной. После прекращения ветрового воздействия происходит баротропизация скорости течений при быстром переходе из одного квазистационарного состояния в другое. Показано, что инерционные движения обладают двумя временными масштабами, определяемыми вертикальной вязкостью.

**Обсуждение и заключение.** Первый, короткий временной масштаб, отвечает за быстрое формирование нового квазистационарного состояния. Он не зависит от коэффициента вязкости и приблизительно равен двум инерционным периодам. Другой, более длинный масштаб затухания инерционных колебаний, связан со стоком энергии квазистационарных колебаний из верхних в глубокие слои моря. Этот медленный процесс затухания пропорционален квадратному корню из времени.

**Ключевые слова:** Черное море, инерционные колебания, теория Экмана, численное моделирование, верхний квазигомогенный слой, аналитическое решение.

**Благодарности:** авторы выражают свою признательность ведущему научному сотруднику ГОИН Е. В. Борисову за ценные замечания по статье. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-77-30001) и РФФИ-РГО (грант № 17-05-41089).

**Для цитирования:** Пространственно-временная изменчивость инерционных течений в восточной части Черного моря в штормовой период / Н. А. Дианский [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 2. С. 147–159. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-147-159

© Дианский Н. А., Фомин В. В., Григорьев А. В., Чаплыгин А. В., Зацепин А. Г., 2019

# Spatial-Temporal Variability of Inertial Currents in the Eastern Part of the Black Sea in a Storm Period

N. A. Diansky<sup>1,2,3\*</sup>, V. V. Fomin<sup>2</sup>, A. V. Grigoriev<sup>2,4</sup>, A. V. Chaplygin<sup>1</sup>,  
A. G. Zatsepin<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (national research university), Dolgoprudny, Russia

<sup>5</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*e-mail: nikolay.diansky@gmail.com

*Introduction.* Analysis of numerical simulation of the inertial oscillations evolution in a storm period in the northeastern Black Sea is represented in comparison with the observations and the analytical solutions. The simulations confirm significant contribution of the inertial motions to formation of the velocity fields. It is shown that inertial oscillations do not affect the sea level changes and their character depends on vertical structure of the sea upper mixed layer.

*Data and methods.* Comparison the simulation results to the drift observations in the Black Sea were represented. It is noted that intensity of inertial oscillations in the deep-sea areas significantly exceeds the one in the shallow areas. At that contribution of the inertial currents to the Black Sea general circulation in the deep-sea zone is comparable to that of the mesoscale motions. Analytical solution of the inertial oscillations' equation system (taking into account wind and its absence) was studied.

*Results.* Inertial oscillations are excited in the velocity module due to an abrupt change of the wind speed. Moreover, harmonic oscillations are disturbed with depth. After the wind affect is over, the current velocity is barotropized due to fast transition from a quasi-stationary state to another one. It is shown that inertial oscillations are of two time scales conditioned by vertical viscosity.

*Discussion and conclusion.* The first, short time scale is responsible for rapid formation of a new quasi-stationary state. It does not depend on the viscosity coefficient and is approximately equal to two inertial periods. The other, longer scale of the inertial oscillations attenuation, is associated with the energy drain of quasi-stationary oscillations from the upper layers of the sea to the deeper ones. This slow process of attenuation is proportional to the root of time.

**Keywords:** Black Sea, inertial oscillations, Ekman theory, numerical simulation, upper mixed layer, analytical solution.

**Acknowledgments:** The authors are thankful to Head Scientist Researcher of State Oceanographic Institute E. V. Borisov for his important remarks on the paper. The investigation is carried out at support of Russian Scientific Foundation (grant № 17-77-30001) and RFBR-RGS (grant № 17-05-41089).

**For citation:** Diansky, N. A., Fomin, V. V., Grigoriev, A. V., Chaplygin, A. V. and Zatsepin, A. G., 2019. Spatial-temporal variability of inertial currents in the northeastern part of the Black Sea. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, 35(2), pp. 147-159. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-147-159 (in Russian).

## Введение

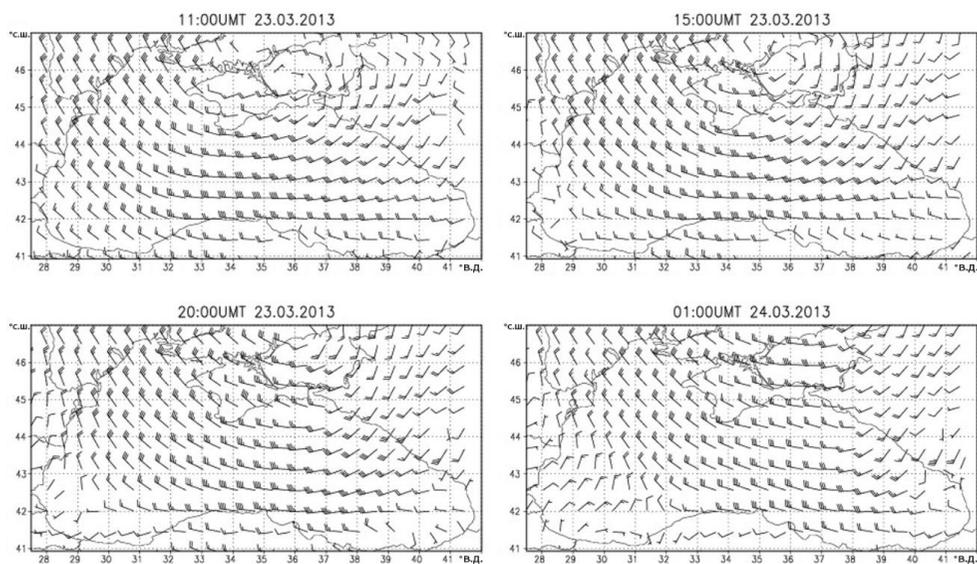
Штормы в Черном море – нередкие события [1–3], они наиболее сильны зимой, а также в переходные сезоны весной и осенью. К таким событиям относится сильнейший шторм 23–24 марта 2013 г., когда практически вся акватория моря находилась на периферии глубокого циклона [1, 4]. Из анализа дрейфтерных данных следует [5, 6], что инерционные колебания вносят существенный вклад в формирование поля течений в Черном море и в периоды штормов не уступают по энергетике мезомасштабным вихревым движениям. При этом их интенсивность оказывается различной в разных частях моря [6].

В настоящей работе приводятся результаты анализа данных численного моделирования циркуляции Черного моря в период шторма, их физическая интерпретация, а также исследование аналитического решения описывающей их системы уравнений.

### Описание технологии получения расчетных полей течений и их анализ

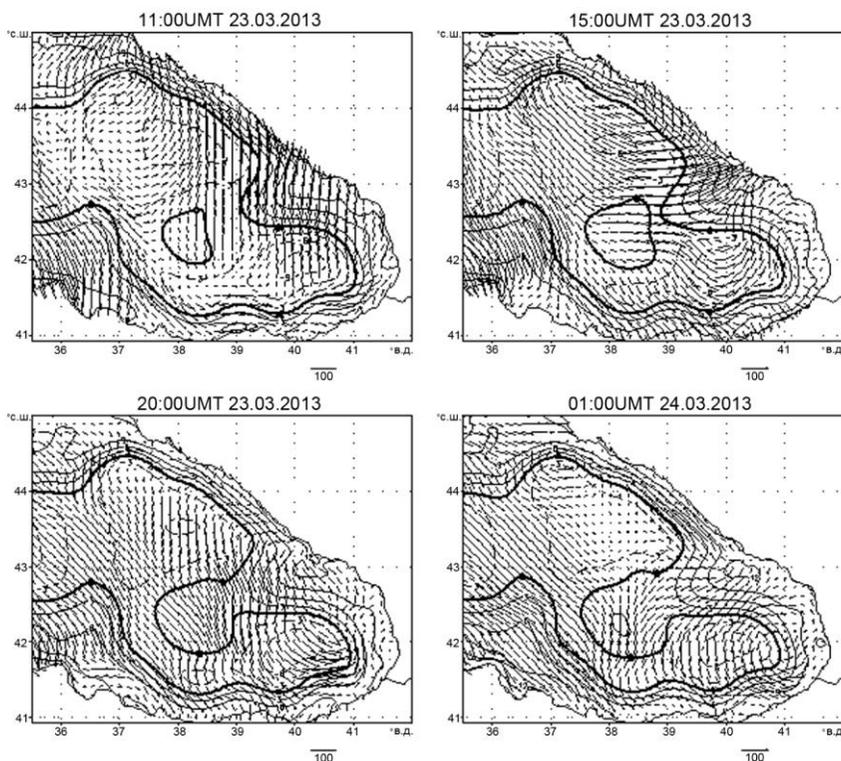
В Государственном океанографическом институте для решения задачи расчета циркуляции на акватории Черного и Азовского морей реализована Система оперативного расчета течений (СОРТ). Для работы СОРТ используются модель морской циркуляции *Institute of Numerical Mathematics Ocean Model (INMOM)* Института вычислительной математики (ИВМ) РАН [7] и региональная негидростатическая модель атмосферной циркуляции *Weather Research Forecast (WRF)* [8]. Их характеристики и результаты верификации подробно описаны в работах [1, 9].

Исследование штормовой ситуации по результатам расчетов по модели *WRF* показало, что скорости ветра в период шторма превышали 20 м/с (рис. 1). Тем не менее, поскольку рельеф дна в регионе имеет приглубый характер, ветровой нагон у побережья на превышал 20 см (рис. 2).



**Р и с. 1.** Поле ветра над Черным морем в различные моменты времени развития шторма  
**Fig. 1.** Wind field over the Black Sea in different moments of storm evolution

Как видно на рис. 2, течения не обнаруживают соответствия со стационарной теорией Экмана. В открытой части моря векторы скорости со временем поворачиваются по часовой стрелке и не проявляют связи с градиентами уровня, что характерно для инерционных течений [10–15]. Согласование с градиентом уровня просматривается только в прибрежных зонах. Таким образом, в мористой области основной вклад в генерацию течений при штормовой ситуации вносят именно инерционные колебания.



**Р и с. 2.** Изолинии уровня моря (сплошные – положительные значения, штриховые – отрицательные) и скорости течений у поверхности (стрелки, см/с) в восточной части Черного моря на те же моменты времени, что на рис. 1. Масштаб векторов скорости приведен под рисунком

**F i g. 2.** Sea level isolines (solid lines – positive values and stroke ones – negative values) and currents velocities near the surface (arrows, cm/s) in the eastern Black Sea for the same time moments as on Fig. 1. Scale of the velocity vectors is under the figure

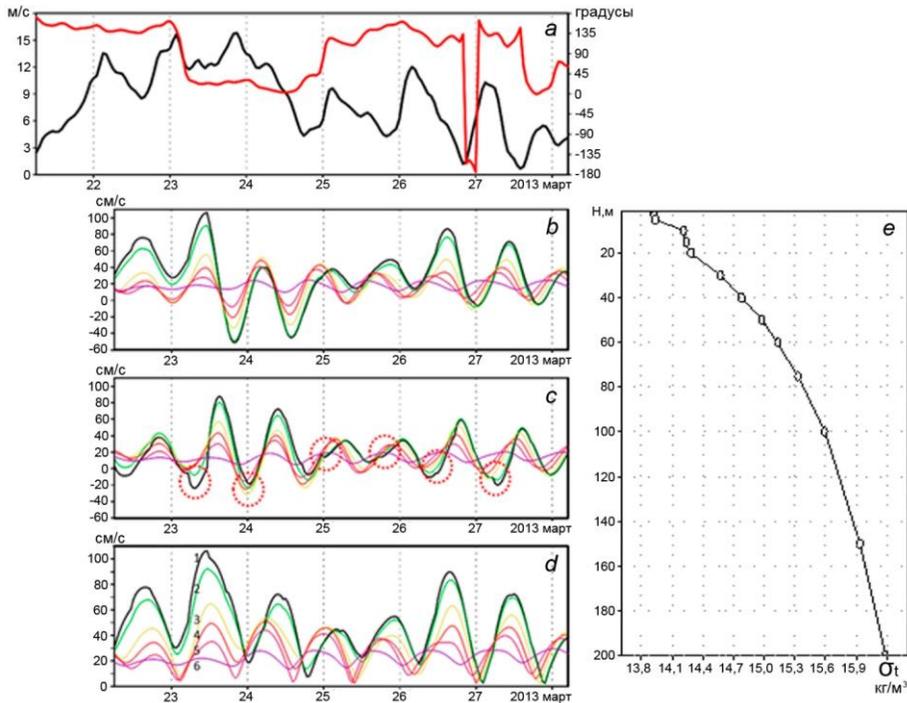
Анализ вертикальной структуры скорости ветра в точке с координатами  $43,0^\circ$  с. ш.,  $39,2^\circ$  в. д. (рис. 3), соответствующей глубоководной области моря, показывает, что действительно наблюдаются инерционные колебания с соответствующим широте инерционным периодом, равным 17,6 ч. В то же время в значениях скорости ветра не отражены колебания с инерционной частотой [10], но заметен сдвиг фаз между максимумами скорости ветра и скоростями инерционных движений в море (рис. 3), что подтверждает их инерционный характер по отношению к вынуждающей силе ветра.

В работе [16] сделана оценка амплитуды скорости инерционных колебаний  $U_0$ , средней в верхнем квазиоднородном слое (ВКС), в зависимости от скорости ветра:

$$U_0 \approx \frac{\tau_0}{\rho_w f H}, \quad (1)$$

где напряжение трения ветра рассчитывается по балк-формуле (см., напр., [7]);  $\tau_0 = \rho_\alpha C_D W_{10}^2$  – модуль напряжения трения ветра со скоростью  $W_{10}$  на высоте 10 м;  $\rho_w$  и  $\rho_\alpha$  – плотность воды и воздуха,  $C_D = (1,1 + 0,04W_{10}) 10^{-3}$  – динамический коэффициент трения;  $f$  – параметр Кориолиса;  $H$  – толщина

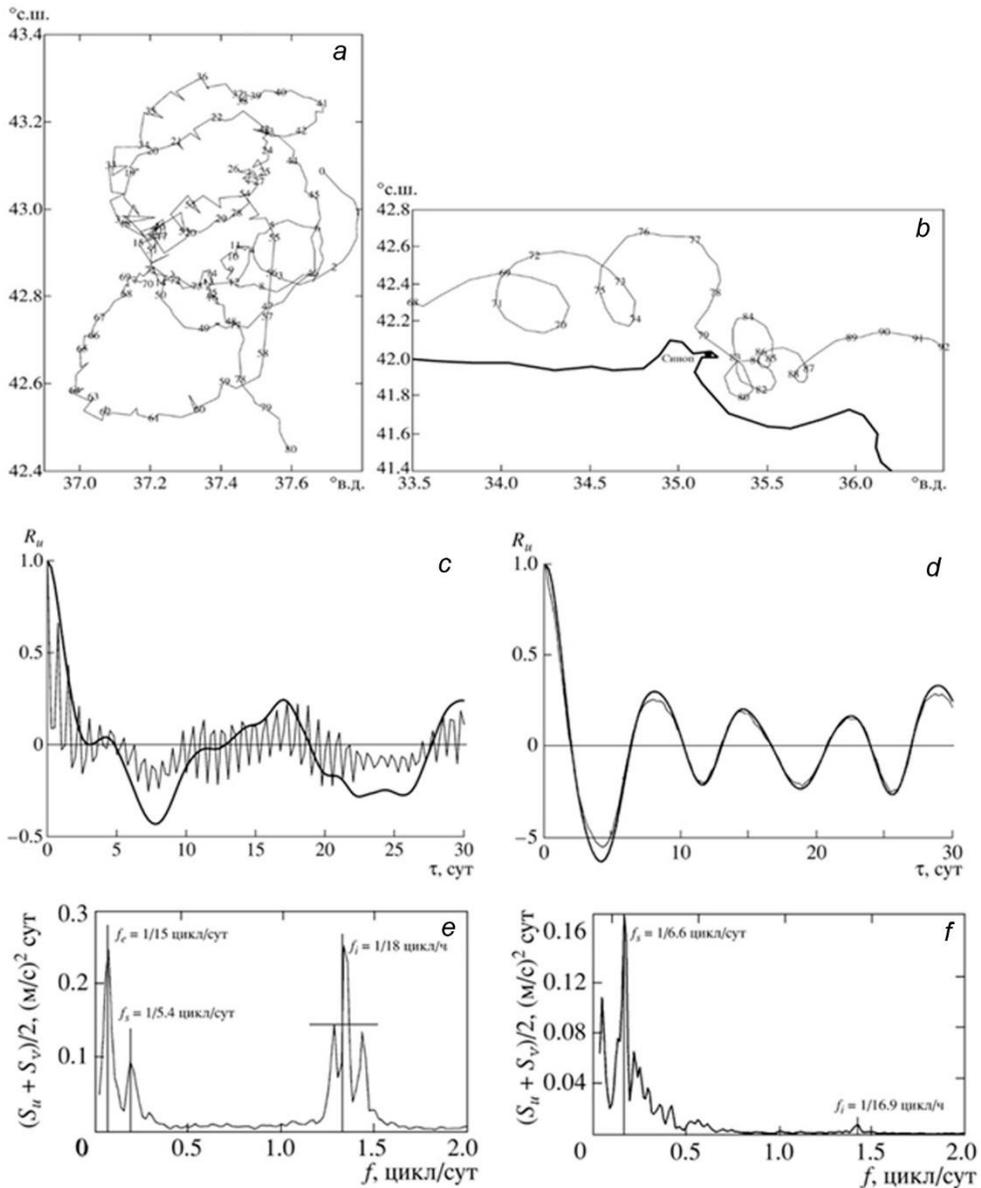
ВКС. Полагая (согласно рис. 3) в (1)  $W_{10} \approx 15$  м/с, в верхнем слое при  $H = 5$  м получим  $U_0 \approx 100$  см/с, а в слое  $H = 20$  м получим  $U_0 \approx 25$  см/с, что хорошо согласуется с нашими расчетами, показанными на рис. 2 и 3.



**Р и с. 3.** Временной ход модуля (м/с, черная линия) и направления (градусы, красная линия) скорости ветра (а), меридиональной (b) и зональной (c) компонент скорости течений (см/с) и модуля скорости течений (d) в точке  $43,0^\circ$  с. ш.,  $39,2^\circ$  в. д. (цветом и цифрами показаны скорости на глубинах: 1 м – кривая 1; 5 м – кривая 2; 10 м – кривая 3; 15 м – кривая 4; 20 м – кривая 5; 30 м – кривая 6), а также вертикальный профиль условной плотности  $\sigma_t$  ( $\text{кг/м}^3$ ) в этой же точке (e)

**F i g. 3.** Temporal variation of module (m/s, black line) and direction (degrees, red line) of wind speed (a), meridian (b) and zonal (c) components (cm/s) and module of currents velocity (d) in the point  $43.0^\circ$  N,  $39.2^\circ$  E (velocities on the depths are shown by colors and numbers: 1m – curve 1; 5 m – curve 2; 10 m – curve 3; 15 m – curve 4; 20 m – curve 5; 30 m – curve 6) and also vertical profile of conventional density  $\sigma_t$  ( $\text{kg/m}^3$ ) in the very same point (e)

По вертикальному профилю плотности в точке анализа можно выделить два разделенных зоной повышенных градиентов квазиоднородных слоев: первый на глубине 0–7,5 м, второй – на глубине 9–25 м (модельные данные, рис. 3, e). Видно, что величины амплитуд инерционных скоростей группируются в пределах этих слоев [17]. При незначительном изменении ветрового воздействия инерционные колебания изменяются только в верхнем слое, оставаясь прежними в нижнем. Такие изменения скорости в верхней части ВКС, рассогласованные с изменениями в нижней части ВКС, отмечены на рис. 3, с кружочками. Этим моментам времени соответствуют изменения в скорости ветра (рис. 3, a).



**Р и с. 4.** Фрагменты траекторий дрейфтеров № 17430 (а) и № 16331 (b) (цифры на траекториях – сутки, прошедшие со времени запуска дрейфтера); нормированные автокорреляции  $R$  зональной компоненты скорости дрейфтеров № 17430 (c) и № 16331 (d) с учетом (тонкая линия) и без учета (жирная линия) инерционных колебаний; суммарная спектральная плотность компонентов скорости  $u$  и  $v$  дрейфтеров № 17430 (e) и № 16331 (f) [6]

**F i g. 4.** Fragments of trajectories of drifters № 17430 (a) and № 16331 (b) (numbers on the trajectories denote the number of days since a drifter launch); normalized autocorrelations  $R$  of zonal component of drifters № 17430 (c) and № 16331 velocities (d) taking into account (thin line) and taking no account (solid line) of inertial oscillations; total spectral density of velocity components  $u$  and  $v$  of drifters № 17430 (e) and № 16331 (f) [6]

С глубиной амплитуда инерционных колебаний уменьшается, а их гармонический характер искажается (рис. 3, *d*). Ниже скачка плотности, на глубину 30 м, инерционные колебания практически не проникают, имея амплитуду менее 5 см/с.

### Сравнение с данными натуральных наблюдений

Особенности циркуляции вод Черного моря в верхнем слое на различных временных масштабах [5] могут быть проиллюстрированы, в частности, опубликованными в работе [6] результатами международного дрейферного эксперимента 1999–2002 гг. Как уже было показано выше по результатам численного эксперимента, инерционные колебания в открытой части моря ярко выражены. Это хорошо согласуется с данными дрейферных наблюдений. На рис. 4 показаны результаты данных дрейферов, траектории которых локализованы в глубоководной (дрейфер № 17430) и сравнительно мелководной (дрейфер № 16331) областях моря. Видно, что в глубоководной области инерционные колебания скорости течений в верхнем слое выражены гораздо более ярко по сравнению с мелководной областью и соизмеримы по энергетике с мезомасштабными движениями [6]. Представленные на рис. 3 результаты моделирования течений в точке анализа относятся к глубоководной зоне. Это позволяет предполагать, что инерционные течения здесь должны хорошо проявляться, что и следует из указанного рисунка.

### Аналитическое исследование поведения инерционных колебаний

Рис. 3, *d* показывает потерю гармонического характера колебаний модуля скорости с глубиной, в то время как в компонентах скорости гармонический характер сохраняется на всех глубинах. Чтобы выяснить причину, рассмотрим поведение инерционных колебаний на основе аналитического решения описывающей их системы уравнений.

Дрейфовые течения (экмановские и инерционные) описываются простой системой линейных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - fv &= \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + fu &= \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $u$  и  $v$  – зональная и меридиональная составляющие скорости течений, зависящие от глубины  $z$  и времени  $t$ ;  $\nu$  – кинематический коэффициент вертикальной турбулентной вязкости.

Свойства решения системы уравнений (2) удобно рассматривать при задании упрощенных граничных условий. Будем считать, что западный ветер, начиная с некоторого момента  $t = 0$ , постоянен по скорости ( $W_{10} = 15$  м/с) и направлению так, что компоненты напряжения трения ветра  $\tau_x > 0$  и  $\tau_y = 0$ . Далее, когда решение установится (этот период в данном случае условно принят равным 15 сут), ветер мгновенно обращается в ноль.

Если представить скорость течения в комплексном виде  $w(z, t) = u(z, t) + iv(z, t)$ , то система уравнений (2) может быть выражена одним уравнением

$$\frac{\partial w}{\partial t} + ifw = \nu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}, \quad (3)$$

с граничными условиями общего вида

$$\begin{aligned} \nu \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=0} &= -\tau_x(t) - i\tau_y(t), \\ w \Big|_{z \rightarrow \infty} &= 0, \\ w(z, 0) &= w_0(z). \end{aligned} \quad (4)$$

Заменой в (3)  $w$  на  $w(z, t) = W(z, t)e^{-ift}$ , где  $W(z, t)$  – амплитуда инерционных колебаний, приходим к классическому уравнению диффузии

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}, \quad (5)$$

для амплитуды (или модуля скорости) инерционных движений со своими граничными условиями, вытекающими из (4). Уравнение (5) описывает затухание амплитуды с глубиной, причем в стационарном случае – по линейному закону.

При решении нашей задачи возбуждения и затухания инерционных колебаний граничные и начальные условия разделяют общую задачу (3) – (5) на две подзадачи. Первая описывает возникновение инерционных колебаний под действием западного ветра с граничными условиями

$$\begin{aligned} \nu \frac{\partial W}{\partial z} \Big|_{z=0} &= -\tau_x e^{ift}, \\ W \Big|_{z \rightarrow \infty} &= 0, \\ W(z, 0) &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

вторая – затухание инерционных движений при отсутствии ветра:

$$\begin{aligned} \nu \frac{\partial W}{\partial z} \Big|_{z=0} &= 0, \\ W \Big|_{z \rightarrow \infty} &= 0, \\ W(z, t_{15}) &= M(z), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $M(z)$  – решение задачи (5) и (6) на 15-е сутки.

Следует отметить, что в силу (6) и (7) амплитуда вынужденных инерционных колебаний (при действии ветра) будет комплексной, а свободных (при отсутствии ветра) – действительной, т. е. амплитуда вынужденных инерционных колебаний будет также испытывать (см. ниже) близкие к гармоническим колебания на инерционной частоте.

Решение первой задачи (5) и (6) для модуля инерционных движений записывается в виде [13]

$$W_1(z, t) = \frac{\tau_x}{\sqrt{v\pi}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \exp\left(-\frac{z^2}{4v\zeta} - if\zeta\right) d\zeta, \quad (8)$$

или для компонентов скорости – в виде, полученном также в [13]:

$$\begin{aligned} u_1(z, t) &= \frac{\tau_x}{\sqrt{v\pi}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \exp\left(-\frac{z^2}{4v\zeta}\right) \cos(f\zeta) d\zeta, \\ v_1(z, t) &= -\frac{\tau_x}{\sqrt{v\pi}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \exp\left(-\frac{z^2}{4v\zeta}\right) \sin(f\zeta) d\zeta. \end{aligned} \quad (9)$$

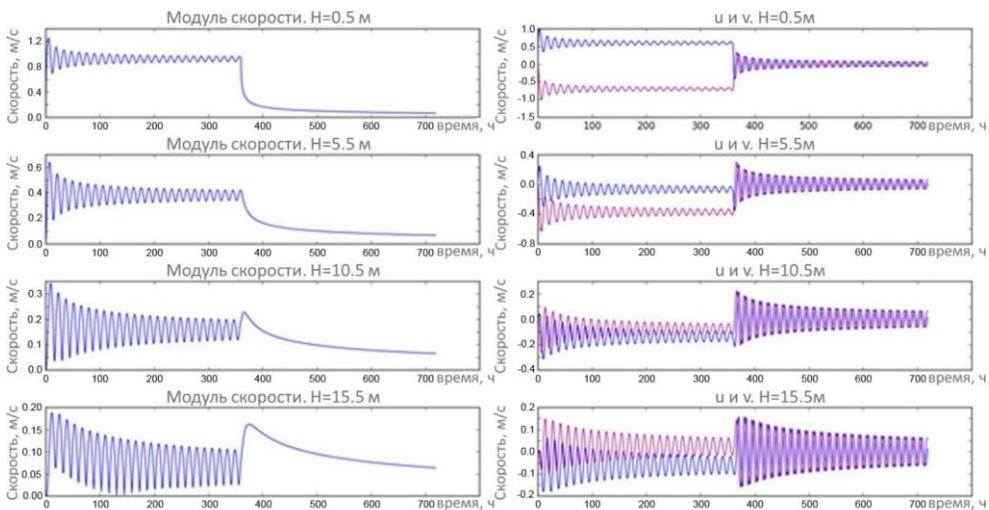
На поверхности моря решение (9) сводится к более простому виду:

$$\begin{aligned} u_1(0, t) &= \frac{2\tau_x}{\sqrt{v\pi f}} C(\sqrt{ft}) \approx \frac{2\tau_x}{\sqrt{v\pi f}} \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} + \frac{1}{\sqrt{ft}} \sin(ft)\right), \\ v_1(0, t) &= -\frac{2\tau_x}{\sqrt{v\pi f}} S(\sqrt{ft}) \approx -\frac{2\tau_x}{\sqrt{v\pi f}} \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{\sqrt{ft}} \cos(ft)\right), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $C(\psi) = \int_0^\psi \cos(t^2) dt$  и  $S(\psi) = \int_0^\psi \sin(t^2) dt$  – интегралы Френеля, которые определяют поведение инерционных скоростей на поверхности моря с фазовым сдвигом между  $u$  и  $v$  на  $\pi/2$ , хорошо заметным на рис. 3 и 5.

Вторая задача (6) и (7) решается следующим образом. При  $t = t_{15}$  решение задачи (5) и (7) будет иметь вид

$$M(z) = \frac{\tau_x}{\sqrt{v\pi}} \int_0^{t_{15}} \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \exp\left(-\frac{z^2}{4v\zeta} - if\zeta\right) d\zeta. \quad (11)$$



**Р и с. 5.** Графики аналитического решения системы инерционных колебаний с ветровой накачкой и без нее (синяя кривая – зональная компонента скорости ветра, пурпурная – меридиональная)

**F i g. 5.** Graphs of analytical solution of the inertial oscillations equation system with wind pumping and without it (blue curve – wind speed zonal component, purple one – wind speed meridian component)

Тогда общее решение задачи (5) и (7) для амплитуды свободных инерционных движений выписывается через интеграл Пуассона [18]:

$$W_2(z, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\nu(t-t_{15})}} \int_0^{+\infty} \left[ \exp\left(-\frac{(z-s)^2}{4\nu(t-t_{15})}\right) + \exp\left(-\frac{(z+s)^2}{4\nu(t-t_{15})}\right) \right] M(s) ds, \quad (12)$$

где  $t \geq t_{15}$ . При этом решение задачи за счет вертикальной вязкости будет перестраиваться от одного решения к другому. Это время можно оценить как

$$t_E \approx d_E^2/\nu = 2/f, \quad \text{где } d_E = \sqrt{\frac{2\nu}{f}} - \text{характерная толщина экспоненциального}$$

затухания в классической задаче Экмана (см., напр., [19]). То есть приблизительно за два инерционных периода и, что интересно, независимо от значения коэффициента вертикальной вязкости инерционные колебания перестраиваются от вынуждаемого ветром к свободному режиму. Таким образом, вынужденное решение с экспоненциальным затуханием по глубине за время  $2/f$  перестраивается к форме, близкой к линейной, и передача вязкостного возмущения в глубину во много раз уменьшается. При этом решение задачи (5) и (7) при  $t \geq t_{15} + t_E$  приближенно можно записать для компонентов скорости как

$$\begin{aligned} u_2(z, t) &\approx |W_2(z, t)| \cos(ft), \\ v_2(z, t) &\approx |W_2(z, t)| \sin(ft). \end{aligned} \quad (13)$$

Из (13) следует, что при прекращении действия ветра инерционные компоненты скорости течений прямо пропорциональны синусу и косинусу, и поэтому фазовый сдвиг между  $u$  и  $v$  компонентами скорости равен  $\pi/2$ . При этом свободные инерционные колебания, согласно их виду (13), в модуле скорости не проявляются. Это подтверждает хорошо известное положение, что они не проявляются в энергетике, так как сила Кориолиса перпендикулярна вектору скорости и не совершает работы [19].

На рис. 5 показан вид решения уравнений (8), (9), (12), (13) для напряжения трения, соответствующего скорости ветра  $W_{10} = 15$  м/с и коэффициенту вертикальной диффузии  $\nu = 20$  см<sup>2</sup>/с, как подходящих для условий сильного шторма при его расчете с помощью модели *INMOM*. Видно, что инерционные колебания под действием постоянного ветра затухают, стремясь к стационарному решению задачи Экмана [19], когда на поверхности моря скорость течения направлена под углом 45° к ветру. При этом модуль скорости инерционных течений при наличии ветра также совершает колебательные движения с инерционной частотой в точном соответствии с решением (8). Причем если у поверхности эти колебания модуля близки к гармоническим, то с глубиной их гармоничность нарушается. Это полностью согласуется и с расчетами по модели *INMOM* (рис. 3, *d*). После прекращения ветрового воздействия модуль скорости не испытывает колебаний в точном соответствии с решением (12), (13). При этом амплитуда (читай – кинетическая энергия) инерционных движений в верхних слоях уменьшается, а в глубинных увеличивается, т. е. происходит перераспределение энергии колебаний (баротропизация) за счет процессов вертикальной вязкости, когда энергия среднего движения Экмана

перераспределяется из верхних слоев в нижние. При этом наблюдается любопытный факт: с некоторой характерной глубины (в данном случае 10 м) в нижних слоях энергия инерционных движений становится больше, чем до прекращения ветрового воздействия.

Решения для скоростей (8) и (11), графики которых показаны на рис. 5, обладают двумя временными масштабами. Первый, короткий масштаб (около двух инерционных периодов), определяется вертикальной вязкостью с коэффициентом  $\nu$  и отвечает за время формирования нового квазистационарного состояния. При этом, как было показано выше, этот масштаб не зависит от самой вязкости. Другой, более длинный масштаб затухания инерционных колебаний, связан со стоком энергии квазистационарных движений, более интенсивных в верхних слоях, в глубокие слои моря. Согласно виду аналитических решений (9), (10), (12), это затухание на больших временах приблизительно пропорционально квадратному корню из времени.

### Выводы

В работе приведен анализ результатов численного моделирования циркуляции Черного моря в период сильного шторма, возбуждающего инерционные колебания. Дана их физическая интерпретация и проведено исследование аналитического решения описывающей их системы уравнений.

Анализ инерционных колебаний по результатам численного моделирования с использованием гидродинамической модели *INMOM* и атмосферной модели *WRF* показал, что эти колебания вносят значительный вклад в формирование поля скорости течений, причем их возбуждение вызывается резким изменением величины модуля скорости ветра. В то же время они практически не оказывают влияния на изменение глубины скачка плотности и уровня моря.

Анализ вертикальной структуры инерционных колебаний показал, что имеет место расслоение инерционных движений по амплитуде и фазе на различных глубинах в приповерхностном слое. С глубиной величины амплитуд инерционных колебаний группируются в квазиоднородных слоях, причем гармонический характер амплитуд искажается.

Амплитуда инерционных движений в глубоководных областях моря значительно выше, чем в мелководных зонах, поскольку в последних имеют место значительные прибрежные градиентные течения. В глубоководных областях вклад инерционных течений в общую циркуляцию Черного моря сравним с мезомасштабным. Амплитуды колебаний инерционных течений в штормовых условиях могут существенно превышать градиентные и вынужденные дрейфовые течения, в том числе и амплитуды интенсивных квазигеострофических вихревых течений. При этом они никак не проявляются на изменениях уровня моря, но могут вносить значительный вклад в распространение пассивной примеси, например загрязняющих веществ.

С помощью аналитических решений показано, что в модуле скорости инерционные колебания проявляются только при ветровой накачке. При этом их гармонический характер нарушается с глубиной. После прекращения действия ветра происходит баротропизация скорости течений с помощью быстрой перестройки из одного квазистационарного состояния в другое в течение

приблизительно двух инерционных периодов. При этом амплитуда инерционных движений в верхних слоях уменьшается, а в глубинных увеличивается так, что с некоторой характерной глубины в нижних слоях энергия инерционных движений становится даже больше, чем до прекращения ветрового воздействия.

То, что инерционная частота проявляется в модуле скорости движения воды при вынуждающей силе ветра, имеет простое физическое объяснение. Поскольку собственные инерционные движения происходят в лагранжевой интерпретации по окружности, то в том случае, когда скорости этих движений совпадают с направлением ветра, происходит их увеличение, когда противоположно – уменьшение.

Показано, что инерционные движения обладают двумя временными масштабами, определяемыми вертикальной вязкостью. Первый, короткий масштаб, отвечает за время формирования нового квазистационарного состояния, он не зависит от коэффициента вертикальной вязкости и равен приблизительно двум инерционным периодам. Другой, более длинный масштаб, связан со стоком энергии квазистационарных инерционных колебаний из верхних в глубокие слои моря. Этот медленный процесс затухания пропорционален квадратному корню из времени.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дианский Н. А., Фомин В. В.* Особенности инерционных течений в период шторма 23–28 марта 2013 г. в северо-восточной части Черного моря // *Процессы в геосредах*. 2016. № 1(5). С. 37–47. URL: [http://www.geomediacentr.ru/media/PGM\\_1\(5\)\\_2016.pdf](http://www.geomediacentr.ru/media/PGM_1(5)_2016.pdf) (дата обращения: 15.10.2018).
2. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : Морской гидрофизический институт, 2011. 209 с.
3. Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием / А. Г. Зацепин [и др.] // *Современные проблемы динамики океана и атмосферы*. М. : Триада ЛТД, 2010. С. 347–368.
4. <http://www.myocean.eu>
5. Variability of water dynamics in the northeastern Black Sea and its effect on water exchange between the near-shore zone and open basin / A. G. Zatsepin [et al.] // *Oceanology*. 2002. Vol. 42, suppl. 1. P. S1–S15.
6. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейфтерным данным / В. М. Журбас [и др.] // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 1. С. 34–48.
7. *Дианский Н. А.* Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М. : Физматлит, 2012. 272 с.
8. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note / William C. Skamarock [et al.]. Boulder, USA : National Center for Atmospheric Research, 2008. 125 p.
9. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov / V. B. Zalesny [et al.] // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2012. Vol. 27, iss.1. P. 95–112. doi:10.1515/rnam-2012-0006
10. *Мамаев О. И.* Морские течения. М. : Издательство МГУ, 1986. 104 с.
11. *Коротчаев Г. К., Сабинин К. Д.* Инерционные колебания на течении со сдвигом скорости произвольного профиля // *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 475, № 2. С. 215–216. doi:10.7868/S086956521720021X

12. *Sabinin K. D., Korotaev G. K.* Inertial oscillations over the background of shear currents in the ocean // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. Vol. 53, iss. 3. P. 352–358. doi:10.1134/S0001433817030100
13. *Коротаев Г. К.* Инерционные колебания и преобразование Галилея // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54, № 2. С. 227–231. doi:10.7868/S0003351518020125
14. *Бондур В. Г., Сабинин К. Д., Гребенюк Ю. В.* Характеристики инерционных колебаний по данным экспериментальных измерений течений на российском шельфе Черного моря // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 1. С. 135–142.
15. *Ball F. K.* Some general theorems concerning the finite motions of a shallow rotating liquid lying on a paraboloid // *Journal of Fluid Mechanics*. 1963. Vol. 17, iss. 2. P. 240–256. <https://doi.org/10.1017/S0022112063001270>
16. *Pollard R. T., Millard R. C. Jr.* Comparison between observed and simulated wind-generated inertial oscillations // *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1970. Vol. 17, iss. 4. P. 813–821. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(70\)90043-4](https://doi.org/10.1016/0011-7471(70)90043-4)
17. *Halpern D.* Variability of Near-Surface Currents in the Atlantic North Equatorial Countercurrent during GATE // *Journal of Physical Oceanography*. 1980. Vol. 10, no. 8. P. 1213–1220. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010<1213:VONSCI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<1213:VONSCI>2.0.CO;2)
18. *Tikhonov A. N., Samarskii A. A.* *Equations of Mathematical Physics*. New York : Dover Publications, Inc., 1990. 785 p.
19. *Шулейкин В. В.* *Физика моря*. М. : Наука, 1968. 1090 с.

*Об авторах:*

**Дианский Николай Ардадьевич**, главный научный сотрудник, кафедра физики моря и вод суши физического факультета, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2), доктор физико-математических наук, доцент, **ORCID ID: 0000-0002-6785-1956**, **ResearcherID: R-8307-2018**, [nikolay.diansky@gmail.com](mailto:nikolay.diansky@gmail.com)

**Фомин Владимир Васильевич**, старший научный сотрудник, отдел численного моделирования гидрофизических процессов, лаборатория оперативного моделирования, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова (119034, Россия, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6), **ORCID ID: 0000-0001-8857-1518**, **ResearcherID: C-2124-2017**, [vladimir-fomin@gmail.com](mailto:vladimir-fomin@gmail.com)

**Григорьев Александр Валентинович**, ведущий научный сотрудник, отдел численного моделирования гидрофизических процессов, лаборатория гидродинамики прибрежной зоны, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова (119034, Россия, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9630-3986**, [ag-privat@mail.ru](mailto:ag-privat@mail.ru)

**Чаплыгин Андрей Викторович**, студент 6-го курса кафедры вычислительных технологий и моделирования факультета вычислительной математики и кибернетики, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2), [achaplygin99@gmail.com](mailto:achaplygin99@gmail.com)

**Зацепин Андрей Георгиевич**, главный научный сотрудник, заведующий отделом динамики океана, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5527-5234**, **Scopus Author ID: 7004260979**, **ResearcherID: E-4999-2014**, [zatsepin@ocean.ru](mailto:zatsepin@ocean.ru)