


## Дискретное уравнение для доступной потенциальной энергии как точное следствие конечно-разностных уравнений модели динамики моря

С. Г. Демьшев 

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

 demyshev@gmail.com

Поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 28.02. 2022;  
принята к публикации 15.03.2022

### *Аннотация*

*Цель.* Получено дискретное уравнение скорости изменения доступной потенциальной энергии в точном соответствии с конечно-разностной постановкой, что обеспечивает адекватное воспроизведение дискретной энергетики. Проведен анализ его слагаемых на основе результатов численного эксперимента с реалистичными атмосферными условиями.

*Методы и результаты.* На основе известных методов вычислительной математики (метод неопределенных коэффициентов, имитационное моделирование) получено конечно-разностное уравнение для доступной потенциальной энергии, которое соответствует его дифференциальному виду. В структуре уравнения появилось дополнительное слагаемое, обусловленное переходом к дискретной задаче, имеющее диффузионный вид. Анализ энергетики для гидрологической зимы 2011 г. в Черном море показал, что в верхнем слое наибольшие значения доступной потенциальной энергии наблюдаются в центральной области моря. Ниже горизонта 100 м доступная потенциальная энергия увеличивается по направлению к берегу, где наблюдается интенсивная мезомасштабная изменчивость. На глубине более 200 м наибольший запас этой энергии сосредоточен в Севастопольском и Батумском антициклонах. Работа основных сил (плавуности, адвекции и горизонтальной диффузии) имеет место в прибрежных областях моря.

*Выводы.* Полученное разностное уравнение скорости изменения доступной потенциальной энергии в точности соответствует дискретной постановке и поэтому адекватно отражает энергетику разностной задачи. На основе анализа уравнения показано, что на скорость изменения доступной потенциальной энергии в зимний период преобладающим образом влияет вихревая активность на свале глубин.

**Ключевые слова:** численное моделирование, доступная потенциальная энергия, потенциальная энергия, Черное море, циклоническая циркуляция, антициклонические вихри, дискретные уравнения, разностное уравнение

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0555-2021-0004 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования».

**Для цитирования:** Демьшев С. Г. Дискретное уравнение для доступной потенциальной энергии как точное следствие конечно-разностных уравнений модели динамики моря // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 239–255. doi:10.22449/0233-7584-2022-3-239-255

# Discrete Equation for the Available Potential Energy as an Exact Consequence of the Numerical Model Equations

S. G. Demyshev ✉

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ demyshev@gmail.com

## Abstract

*Purpose.* The work is aimed at obtaining a discrete equation for the rate of the available potential energy change in strict accordance with the finite-difference formulation that ensures adequate reproduction of discrete energy, and at analyzing its terms based on the results of a numerical experiment with realistic atmospheric forcing.

*Methods and Results.* On the basis of the well-known methods of computational mathematics (method of indeterminate coefficients and imitation modeling), obtained was a finite-difference equation for the available potential energy which corresponded to its differential form. In the equation structure, an additional term which was conditioned by transition to a discrete problem and had a diffusion form appeared. Energy of the hydrological winter, 2011, in the Black Sea, having been analyzed, has shown that the available potential energy highest values in the upper layer took place in the central region of the sea. Below 100 m, the available potential energy increased towards the coast where intense mesoscale variability was observed. At the depths exceeding 200 meters, the available potential energy largest stock was concentrated in the Sevastopol and Batumi anticyclones. Action of the main forces, namely the forces of buoyancy, advection and horizontal diffusion, takes place in the coastal areas of the sea.

*Conclusions.* The resulting difference equation for the rate of the available potential energy change exactly corresponds to the discrete formulation and, therefore, accurately reflects the energy of the discrete problem. Analysis of the equation permitted to show that in winter, the rate of the available potential energy change is influenced predominantly by eddy activity at the depth slope.

**Keywords:** numerical simulation, available potential energy, potential energy, Black Sea, cyclonic circulation, anticyclonic eddies, discrete energy equation, difference equation

**Acknowledgments:** the investigation was carried out within the framework of the state assignment of FRC MHI on theme No. 0555-2021-0004 “Fundamental studies of oceanological processes determining state and evolution of marine environment under the influence of natural and anthropogenic factors, based on the observation and modeling methods”.

**For citation:** Demyshev, S.G., 2022. Discrete Equation for the Available Potential Energy as an Exact Consequence of the Numerical Model Equations. *Physical Oceanography*, 29(3), pp. 221-236. doi:10.22449/1573-160X-2022-3-221-236

## Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется анализу энергетики численных экспериментов по моделированию циркуляции в морях и океанах, поскольку он позволяет непосредственно оценить роль основных сил в процессах изменчивости циркуляции. Оценка баланса вихревой и средней энергии помогает понять, как взаимодействуют движения различных масштабов и какие силы являются определяющими в этом процессе.

В работе [1] рассчитываются компоненты бюджета кинетической энергии в моделях Мирового океана в зависимости от горизонтального разрешения и горизонтальной вязкости. При расчете энергетики прямые и обратные каскады энергии точнее описываются в модели, воспроизводящей структуры с размерами, меньшими бароклинного радиуса деформации Россби. На осно-

ве оценки сезонной изменчивости вихревой кинетической энергии в работе [2] анализируется мезомасштабная изменчивость поля скорости. Энергетический анализ течений в полужамкнутых морях позволяет изучать динамику течения Курошио [3], исследовать эволюцию вихревой активности в Красном море [4]. В работе [5] на основе вихреразрешающей модели анализируются причины и эволюция мезомасштабной изменчивости циркуляции Охотского моря. Для этого рассчитывается и анализируется бюджет кинетической энергии. Показано, что генерация мезомасштабных особенностей вдольбереговой циркуляции обусловлена главным образом бароклинной неустойчивостью.

В классической работе Э. Лоренца [6] вводится понятие доступной потенциальной энергии (ДПЭ) как части потенциальной энергии, которая может переходить в кинетическую и обратно. Сумма кинетической и ДПЭ – новый инвариант, который сохраняется при отсутствии внешних источников, трения и диффузии. Введя понятия средней по времени энергии и вихревой энергии как отклонения от средней [7, 8], можно построить энергетический цикл, который позволяет оценить процессы взаимодействия между средними и вихревыми движениями в морях и океанах. Традиционным методом аппроксимации уравнений для скорости изменения кинетической и ДПЭ является дискретизация дифференциальных энергетических уравнений. В этом случае, строго говоря, конечно-разностные уравнения энергетики не соответствуют дискретным уравнениям модели, что может приводить к неточным количественным оценкам. Более корректным подходом должен быть вывод энергетических уравнений из разностных уравнений задачи.

В работе [9] конечно-разностные уравнения для скорости изменения кинетической и потенциальной энергии были получены из исходной дискретной постановки и на их основе исследовались энергоактивные области климатической циркуляции Черного моря. Настоящая работа является продолжением этих исследований и посвящена выводу и анализу уравнения для ДПЭ как точного следствия дискретных уравнений модели. На примере зимнего периода 2011 г. рассчитываются энергетические слагаемые уравнения для ДПЭ и проводится анализ их структуры.

### Уравнения модели и краевые условия

Уравнения модели динамики Черного моря в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды имеют вид [9]

$$u_t - (\xi + f)v + wu_z = -g\zeta_x - \frac{1}{\rho_0}(P' + E)_x + (vVu_z)_z - v_H \nabla^4 u, \quad (1)$$

$$v_t + (\xi + f)u + wv_z = -g\zeta_y - \frac{1}{\rho_0}(P' + E)_y + (vVv_z)_z - v_H \nabla^4 v, \quad (2)$$

$$u_x + v_y + w_z = 0, \quad (3)$$

$$P = g\rho_0\zeta + g \int_0^z \rho d\mu = g\rho_0\zeta + P', \quad (4)$$

$$T_t + (uT)_x + (vT)_y + (wT)_z = -\kappa^H \nabla^4 T + (\kappa^V T_z)_z, \quad (5)$$

$$S_t + (uS)_x + (vS)_y + (wS)_z = -\kappa^H \nabla^4 S + (\kappa^V S_z)_z, \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S). \quad (7)$$

Обозначения в соотношениях (1)–(7) общепринятые [9]. Вид функции  $\rho$  в выражении (7) будет уточнен позднее.

При  $z = 0$

$$v_v u_z = -\tau^x, \quad v_v v_z = -\tau^y, \quad w = -\zeta_t, \quad \kappa^V T_z = Q^T, \quad \kappa^V S_z = (Pr - Ev)S_0, \quad (8)$$

при  $z = H(x, y)$

$$u = v = w = 0, \quad T_z = S_z = 0. \quad (9)$$

На твердых боковых стенках для меридиональных участков границы

$$u = \nabla^2 u = v_x = \nabla^2 v_x = 0, \quad T_x = S_x = 0, \quad (10.1)$$

для зональных –

$$v = \nabla^2 v = v_y = \nabla^2 v_y = 0, \quad T_y = S_y = 0. \quad (10.2)$$

На участках границы, где втекают реки и нижнебосфорское течение, поставим следующие условия:

для меридиональных участков

$$u = \nabla^2 u = v_y = \nabla^2 v_x = 0, \quad T = T^P, \quad S = S^P. \quad (11.1)$$

для зональных –

$$v = \nabla^2 v = u_y = \nabla^2 u_y = 0, \quad T = T^P, \quad S = S^P. \quad (11.2)$$

Для верхнебосфорского течения выполняются условия (10).

В соотношениях (8)–(11) использованы следующие обозначения:  $(\tau^x, \tau^y)$  – касательное напряжение трения ветра;  $Q^T(x, y, t)$  – поток тепла;  $S_0$  – соленость на поверхности моря, полученная в модели;  $Pr(x, y, t)$  – осадки;  $Ev(x, y, t)$  – испарение на поверхности моря;  $(T^P, S^P)$  – заданные по результатам наблюдений температура и соленость в устьях рек и в нижнебосфорском течении.

Уравнения (1)–(7) дополняются в соответствии с параметризацией Меллора – Ямады 2.5 [10] уравнениями для кинетической энергии турбулентности и макромасштаба турбулентности с соответствующими краевыми и начальными условиями.

Начальные условия для задачи (1)–(11) принимались в следующем виде [11]:

при  $t = t_0$

$$(T, S) = (T^0, S^0), \quad u = u^0, \quad v = v^0, \quad \zeta = \zeta^0. \quad (12)$$

# 1. Вывод разностного уравнения скорости изменения ДПЭ

Рассмотрим задачу при отсутствии внешних сил и диффузии (в адиабатическом приближении).

Полагаем, что

$$\rho(x, y, z, t) = \rho^*(x, y, z, t) + \rho^S(z),$$

где

$$\rho^S(z) = \frac{1}{T} \int \left( \frac{1}{\Omega} \iint_S \rho(x, y, z, t) d\Omega \right) dt, \quad d\Omega = dx dy, \quad (13)$$

где  $\Omega$  – область интегрирования на уровне  $z$ ;  $T$  – время интегрирования (в нашем случае равно одному году).

Введем обозначения:

$$A^{pe} = a^{pe} \left( \rho_z^S \right)^{-1}, \quad \text{где} \quad a^{pe} = g \frac{\left( \rho^* \right)^2}{2}.$$

Уравнение для плотности имеет вид

$$\rho_t + (u\rho)_x + (v\rho)_y + (w\rho)_z = 0. \quad (14)$$

Подставляя разложение (13) в выражение (14) получаем

$$\rho_t^* + u\rho_x^* + v\rho_y^* + w\rho_z^* + w\rho_z^S + \rho^*(u_x + v_y + w_z) = 0. \quad (15)$$

Преобразуя выражение (15), получаем уравнение для ДПЭ

$$A_t^{pe} + \left[ (ua^{pe})_x + (va^{pe})_y + (wa^{pe})_z \right] \left( \rho_z^S \right)^{-1} + g\rho^* w + a^{pe} (u_x + v_y + w_z) \left( \rho_z^S \right)^{-1} = 0. \quad (16)$$

В дифференциальном виде в силу выполнения уравнения неразрывности последние слагаемые в уравнениях (15), (16) равны нулю. В разностной постановке это может быть не так вследствие несоответствия аппроксимации  $\rho_z^S$  как множителя для горизонтальной и вертикальной адвекции.

Введем следующие обозначения (для  $j, k$  – аналогично) для  $\varphi$  – произвольной сеточной функции, определенной в точках  $i, j, k$  (рис. 1):

$$z_{k+1/2} = \frac{z_{k+1} + z_k}{2}, \quad h_z^{k+1/2} = z_{k+1} - z_k, \quad h_z^k = z_{k+1/2} - z_{k-1/2},$$

$$\delta_x \varphi_{i,j,k} = \frac{\varphi_{i+1/2,j,k} - \varphi_{i-1/2,j,k}}{h_x}, \quad \nabla_{x,y}^2 \varphi_{i,j,k} = \delta_x^2 \varphi_{i,j,k} + \delta_y^2 \varphi_{i,j,k},$$

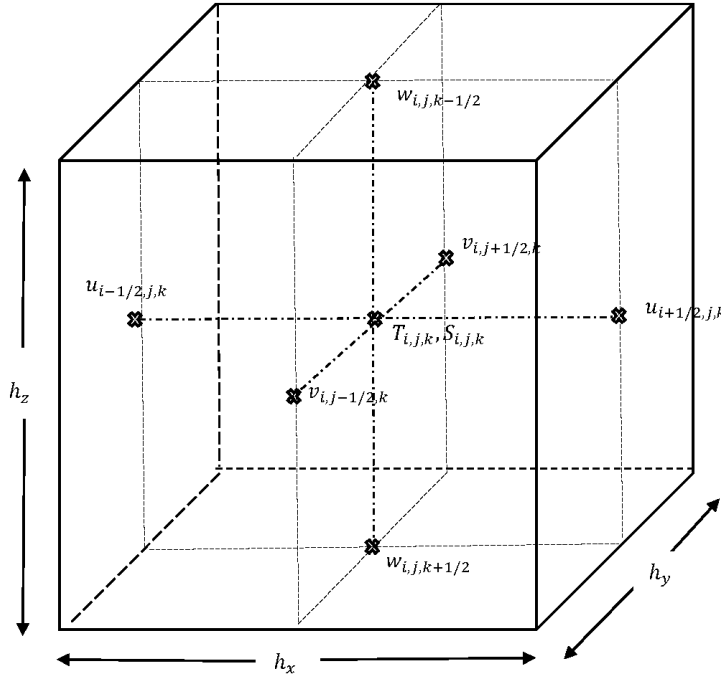
$$\nabla_{x,y}^4 \varphi_{i,j,k} = \nabla_{x,y}^2 \left( \nabla_{x,y}^2 \varphi_{i,j,k} \right).$$

Выпишем конечно-разностные аналоги уравнений (3), (5), (6):

$$\delta_x u_{i,j,k} + \delta_y v_{i,j,k} + \delta_z w_{i,j,k} = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_{i,j,k}}{\partial t} + \delta_x (u_{i,j,k} T_{i,j,k}) + \delta_y (v_{i,j,k} T_{i,j,k}) + \delta_z (w_{i,j,k} T_{i,j,k}) = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial S_{i,j,k}}{\partial t} + \delta_x (u_{i,j,k} S_{i,j,k}) + \delta_y (v_{i,j,k} S_{i,j,k}) + \delta_z (w_{i,j,k} S_{i,j,k}) = 0. \quad (19)$$



**Р и с. 1.** Схематическое изображение бокса  $(i, j, k)$  и пространственное распределение переменных

**F i g. 1.** Schematic image of the box  $(i, j, k)$  and spatial distribution of the variables

Уравнение для разностного аналога плотности в адиабатическом приближении имеет вид

$$\frac{\partial \rho_{i,j,k}}{\partial t} + \delta_x (u_{i,j,k} \rho_{i,j,k}) + \delta_y (v_{i,j,k} \rho_{i,j,k}) + \delta_z (w_{i,j,k} \rho_{i,j,k}) = 0. \quad (20)$$

Введем дискретный аналог в разложении (13):

$$\rho_{k+1/2}^s = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \sum_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\Omega_{k+1/2}} \left( \sum_{i,j} \rho_{i,j,k+1/2} h_x h_y \right) h_t,$$

где  $h_t$  – шаг по времени;  $\Omega_{k+1/2}$  – площадь поверхности на уровне  $z_{k+1/2}$ ;  $t_1$  – начальный,  $t_2$  – конечный момент интегрирования.

Полагаем, что в дискретном виде разложение (13) записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho_{i,j,k} &= \rho_{i,j,k}^* + \rho_k^S, & \rho_{i+1/2,j,k} &= \rho_{i+1/2,j,k}^* + \rho_k^S, \\ \rho_{i,j+1/2,k} &= \rho_{i,j+1/2,k}^* + \rho_k^S, & \rho_{i,j,k+1/2} &= \rho_{i,j,k+1/2}^* + \rho_{k+1/2}^S. \end{aligned} \quad (21)$$

Подставляя выражения (21) в формулу (20) и, учитывая разностные уравнения (17)–(19), получаем аналог уравнения (15):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{i,j,k}^*}{\partial t} + \delta_x (u_{i,j,k} \rho_{i,j,k}^*) + \delta_y (v_{i,j,k} \rho_{i,j,k}^*) + \delta_z (w_{i,j,k} \rho_{i,j,k}^*) + \\ + \rho_k^S (\delta_x u_{i,j,k} + \delta_y v_{i,j,k} + \delta_z w_{i,j,k}) = -\overline{w_{i,j,k}}^z \delta_z \rho_k^S. \end{aligned} \quad (22)$$

Аппроксимации плотности в центре и на гранях бокса зависят от температуры и солености, которые в свою очередь удовлетворяют нелинейному уравнению состояния. Для того чтобы согласовать разностные аналоги  $\rho_{i,j,k}$ ,  $\rho_{i,j,k+1/2}$  с  $T_{i,j,k}$ ,  $T_{i,j,k+1/2}$ ,  $S_{i,j,k}$ ,  $S_{i,j,k+1/2}$ , получены специальные соотношения [9]. Из них следует, что  $\rho_k^S \neq \rho_k^S$ . Поэтому вид выражения (22), в котором последнее слагаемое в левой части равно нулю, обеспечивается аппроксимацией уравнения (21).

Полагаем, что уравнение состояния записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho_{i,j,k} &= \sum_{n=0}^2 \sum_{m=0}^1 a_{nm} T_{i,j,k}^n S_{i,j,k}^m = a_{00} + a_{10} T_{i,j,k} + a_{01} S_{i,j,k} + \\ &+ a_{11} T_{i,j,k} S_{i,j,k} + a_{20} T_{i,j,k}^2. \end{aligned} \quad (23)$$

Тогда, рассматривая плотность как функционал от  $T_{i,j,k}$  и  $S_{i,j,k}$  и дифференцируя уравнение (23), получаем

$$\left( \rho_{i,j,k} \right)'_T = a_{10} + a_{11} S_{i,j,k} + 2a_{20} T_{i,j,k}, \quad \left( \rho_{i,j,k} \right)'_S = a_{01} + a_{11} T_{i,j,k}.$$

Выражения для расчета плотности на гранях бокса [9] имеют вид

$$\begin{aligned} \rho_{i+1/2,j,k} &= \alpha_{10} \overline{T_{i+1/2,j,k}}^x + \alpha_{01} \overline{S_{i+1/2,j,k}}^x + \alpha_{20} T_{i+1,j,k} T_{i,j,k} + \\ &+ \alpha_{11} \frac{T_{i,j,k} S_{i+1,j,k} + T_{i+1,j,k} S_{i,j,k}}{2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{i,j+1/2,k} &= \alpha_{10} \overline{T_{i,j+1/2,k}}^y + \alpha_{01} \overline{S_{i,j+1/2,k}}^y + \alpha_{20} T_{i,j+1,k} T_{i,j,k} + \\ &+ \alpha_{11} \frac{T_{i,j,k} S_{i,j+1,k} + T_{i,j+1,k} S_{i,j,k}}{2}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \rho_{i,j,k+1/2} &= \alpha_{10} \overline{T_{i,j,k+1/2}}^z + \alpha_{01} \overline{S_{i,j,k+1/2}}^z + \alpha_{20} T_{i,j,k+1} T_{i,j,k} + \\ &+ \alpha_{11} \frac{T_{i,j,k} S_{i,j,k+1} + T_{i,j,k+1} S_{i,j,k}}{2}. \end{aligned}$$

Тогда с учетом представления (24)

$$\rho_{i,j,k}^* = \overline{\rho_{i,j,k}^*}^x - \varphi_{i,j,k}^x, \quad \rho_{i,j,k}^* = \overline{\rho_{i,j,k}^*}^y - \varphi_{i,j,k}^y, \quad \rho_{i,j,k}^* = \overline{\rho_{i,j,k}^*}^z - \varphi_{i,j,k}^z, \quad (25)$$

$$\text{где } \varphi_{i,j,k}^x = \frac{h_x^2}{4} \left[ \left( \rho_{i,j,k}^* \right)'_T \delta_x^2 T_{i,j,k} + \left( \rho_{i,j,k}^* \right)'_S \delta_x^2 S_{i,j,k} \right],$$

$$\varphi_{i,j,k}^y = \frac{h_y^2}{4} \left[ \left( \rho_{i,j,k}^* \right)'_T \delta_y^2 T_{i,j,k} + \left( \rho_{i,j,k}^* \right)'_S \delta_y^2 S_{i,j,k} \right],$$

$$\varphi_{i,j,k}^z = \frac{h_z^k}{4} \left[ \left( \rho_{i,j,k}^* \right)'_T \delta_z \left( h_z^k \delta_z T_{i,j,k} \right) + \left( \rho_{i,j,k}^* \right)'_S \delta_z \left( h_z^k \delta_z S_{i,j,k} \right) \right].$$

Полагаем, что

$$A_{i,j,k}^{pe} = a_{i,j,k}^{pe} \left( \delta_z \rho_k^s \right)^{-1}, \quad \text{где } a_{i,j,k}^{pe} = g \frac{\left( \rho_{i,j,k}^* \right)^2}{2}, \quad (26)$$

$$a_{i+1/2,j,k}^{pe} = g \frac{\left( \rho_{i+1/2,j,k}^* \right)^2}{2}, \quad a_{i,j+1/2,k}^{pe} = g \frac{\left( \rho_{i,j+1/2,k}^* \right)^2}{2},$$

$$a_{i,j,k+1/2}^{pe} = g \frac{\left( \rho_{i,j,k+1/2}^* \right)^2}{2}.$$

Проведя простые преобразования, мы получаем следующее уравнение (аналог уравнения (16)):

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{i,j,k}^{pe}}{\partial t} &+ \left\{ \delta_x \left( u_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe} \right) + \delta_y \left( v_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe} \right) + \delta_z \left( w_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe} \right) \right\} \left( \delta_z \rho_k \right)^{-1} + \\ &+ \frac{g}{2} \left[ \rho_{i+1/2,j,k}^* \rho_{i-1/2,j,k}^* \delta_x u_{i,j,k} + \rho_{i,j+1/2,k}^* \rho_{i,j-1/2,k}^* \delta_y v_{i,j,k} + \right. \\ &\left. + \rho_{i,j,k+1/2}^* \rho_{i,j,k-1/2}^* \delta_z w_{i,j,k} \right] \left( \delta_z \rho_k \right)^{-1} = \end{aligned} \quad (27)$$



$$= -g \overline{w_{i,j,k}}^z \rho_{i,j,k}^* + g \left[ \varphi_{i,j,k}^x \delta_x (u_{i,j,k} \rho_{i,j,k}^*) + \varphi_{i,j,k}^y \delta_y (v_{i,j,k} \rho_{i,j,k}^*) + \varphi_{i,j,k}^z \delta_z (w_{i,j,k} \rho_{i,j,k}^*) \right] (\delta_z \rho_k)^{-1}.$$

Рассмотрим слагаемые в этом уравнении. Первые два в левой части уравнения (27) понятны. Третий член в квадратных скобках не имеет аналога в дифференциальном уравнении и является дополнительным разностным слагаемым после умножения выражения (22) на разложение (25). Его происхождение связано с принятым в формулах (26) представлением ДПЭ на гранях бокса, которое, строго говоря, может быть и другим. Поэтому кажется возможным найти подходящие выражения для  $a_{i+1/2,j,k}^{pe}$ ,  $a_{i,j+1/2,k}^{pe}$ ,  $a_{i,j,k+1/2}^{pe}$ , чтобы точнее аппроксимировать уравнение (16).

Первое слагаемое в правой части уравнения (27) описывает работу силы плавучести, второе – дополнительный член, который, учитывая разложение (25), имеет диффузионный вид. Оценки показывают, что его величина на порядок меньше физической диффузии. Поэтому если его включить в диффузионное слагаемое, то результат решения изменится незначительно.

Перепишем уравнения (20), (27) с учетом диффузии:

$$\frac{\partial \rho_{i,j,k}}{t} + \delta_x (u_{i,j,k} \rho_{i,j,k}) + \delta_y (v_{i,j,k} \rho_{i,j,k}) + \delta_z (w_{i,j,k} \rho_{i,j,k}) = \left( D_V^{\rho} + D_H^{\rho} \right)_{i,j,k}, \quad (28)$$

$$\frac{\partial A_{i,j,k}^{pe}}{\partial t} + \left\{ \delta_x (u_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe}) + \delta_y (v_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe}) + \delta_z (w_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe}) \right\} (\delta_z \rho_k)^{-1} + g \overline{w_{i,j,k}}^z \rho_{i,j,k}^* + \omega_{i,j,k} = \left( D_V^{ape} + D_H^{ape} \right)_{i,j,k}, \quad (29)$$

где в разностную диффузию по горизонтали и вертикали включены соответствующие слагаемые, а  $\omega_{i,j,k}$  имеет очевидный вид.

Перепишем уравнение (29) в символьном виде:

$$\frac{\partial A_{i,j,k}^{pe}}{\partial t} + \alpha_{i,j,k} + b_{i,j,k} + \omega_{i,j,k} = \left( D_V^{ape} + D_H^{ape} \right)_{i,j,k}. \quad (30)$$

В уравнениях (28)–(30) введены обозначения

$$\alpha_{i,j,k} = \left\{ \delta_x (u_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe}) + \delta_y (v_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe}) + \delta_z (w_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe}) \right\} (\delta_z \rho_k)^{-1},$$

$$b_{i,j,k} = -g \overline{w_{i,j,k}}^z \rho_{i,j,k}^*.$$

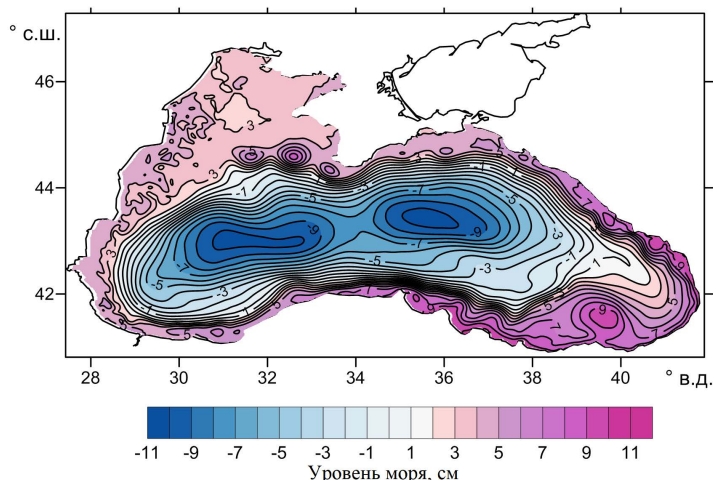
$$\begin{aligned}
\left(D_V^{\rho}\right)_{i,j,k} &= \alpha_{10} \delta_z [\kappa_{i,j,k}^V (\delta_z T_{i,j,k})] + \alpha_{01} \delta_z [\kappa_{i,j,k}^V (\delta_z S_{i,j,k})] + \\
&+ 2\alpha_{20} [\delta_z [\kappa_{i,j,k}^V \overline{T_{i,j,k}}^z (\delta_z T_{i,j,k})] + \\
&+ \alpha_{11} \left[ T_{i,j,k} \delta_z [\kappa_{i,j,k}^V (\delta_z S_{i,j,k})] + S_{i,j,k} \delta_z [\kappa_{i,j,k}^V (\delta_z T_{i,j,k}) \right], \\
\left(D_H^{\rho}\right)_{i,j,k} &= \kappa^H (\alpha_{10} \nabla_{xy}^2 T_{i,j,k} + \alpha_{01} \nabla_{xy}^2 S_{i,j,k} + 2\alpha_{20} T_{i,j,k} \nabla_{xy}^2 T_{i,j,k} + \\
&+ \alpha_{11} [T_{i,j,k} \nabla_{xy}^2 S_{i,j,k} + S_{i,j,k} \nabla_{xy}^2 T_{i,j,k}]), \\
\left(D_V^{ape}\right)_{i,j,k} &= g \rho_{i,j,k}^* \left(D_V^{\rho}\right)_{i,j,k} \left(\delta_z \rho_k^S\right)^{-1} + \\
&+ g \frac{h_z^k}{4} \left[ \left(\rho_{i,j,k}^*\right)'_T \delta_z \left(h_z^k \delta_z T_{i,j,k}\right) + \left(\rho_{i,j,k}^*\right)'_S \delta_z \left(h_z^k \delta_z S_{i,j,k}\right) \right] \delta_z \left(w_{i,j,k} \rho_{i,j,k}^*\right) \left(\delta_z \rho_k\right)^{-1}, \\
\left(D_H^{ape}\right)_{i,j,k} &= g \rho_{i,j,k}^* \left(D_H^{\rho}\right)_{i,j,k} \left(\delta_z \rho_k^S\right)^{-1} + \\
&+ g \left\{ \frac{h_x^2}{4} \left[ \left(\rho_{i,j,k}^*\right)'_T \delta_x^2 T_{i,j,k} + \left(\rho_{i,j,k}^*\right)'_S \delta_x^2 S_{i,j,k} \right] + \right. \\
&\left. + \frac{h_y^2}{4} \left[ \left(\rho_{i,j,k}^*\right)'_T \delta_y^2 T_{i,j,k} + \left(\rho_{i,j,k}^*\right)'_S \delta_y^2 S_{i,j,k} \right] \right\} \left(\delta_z \rho_k^S\right)^{-1}.
\end{aligned}$$

### 3. Результаты численных расчетов

Для анализа слагаемых уравнения скорости изменения ДПЭ (29), которые дают основной вклад в энергетический цикл, воспользуемся результатами расчетов циркуляции Черного моря для реалистических атмосферных условий 2011 г. [11]. Разрешение по горизонтали составляло  $1,6 \times 1,6$  км, по вертикали расчет проводился на 27 горизонтах. Поля для начальных условий (12) соответствовали 1 января 2011 г.

Заметим, что  $\rho_k^S$  рассчитывали как средний профиль по вертикали за год.

Для примера рассмотрим режим зимней циркуляции. В 2011 г. он характеризовался наличием на протяжении всего года отчетливо выраженного Основного Черноморского течения, которое интенсифицировалось в зимне-весенний и ослабевало в летне-осенний период (рис. 2). По его периферии наблюдались антициклонические вихри различного горизонтального масштаба и интенсивности. Подробно динамика течений Черного моря в 2011 г. рассмотрена в работе [11], поэтому перейдем к анализу изменчивости ДПЭ в это время года.



**Р и с. 2.** Приведенный уровень моря (в см) на 1 февраля 2011 г.

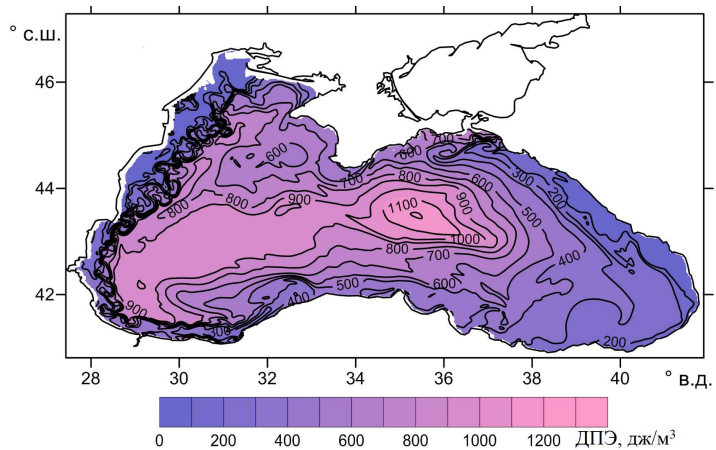
**F i g. 2.** Reducible sea level (cm) on February 1, 2011

На рис. 3 приводится горизонтальная структура ДПЭ на середину гидрологической зимы 2011 г. Средняя по горизонту ДПЭ уменьшается с глубиной и ниже горизонта 50 м ее значения на порядок меньше, чем в верхнем 30-метровом слое.

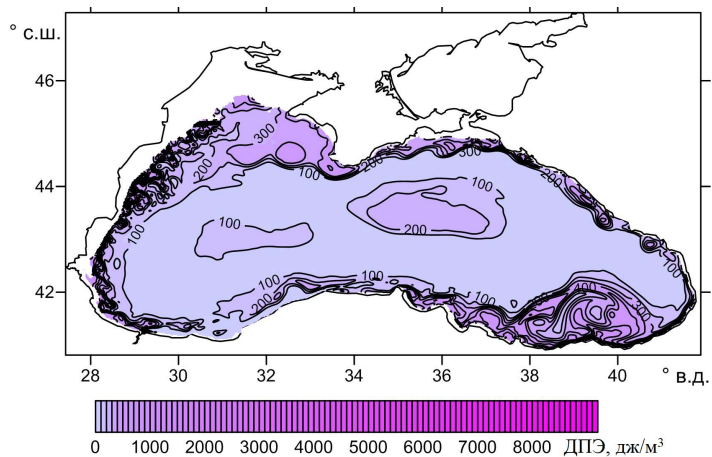
В верхнем 30-метровом слое в центральной области моря (рис. 3, *a*), соответствующей центру циклонического круговорота, наблюдаются большие значения ДПЭ, которые уменьшаются к периферии области. Ниже имеет место обратная тенденция – в центре моря меньшие значения, чем на его периферии (рис. 3, *b*, *c*). Причем в глубинных слоях (ниже горизонта 200 м) наибольший запас ДПЭ имеет место в антициклонических круговоротах (Севастопольском и Батумском). Локальный максимум ДПЭ на горизонте 50 м (рис. 3, *b*) обусловлен втоком мраморноморских вод.

Рассмотрим структуру основных энергетических слагаемых в уравнении (29). Базовой характеристикой энергообмена является работа силы плавучести, которая представлена на рис. 4.

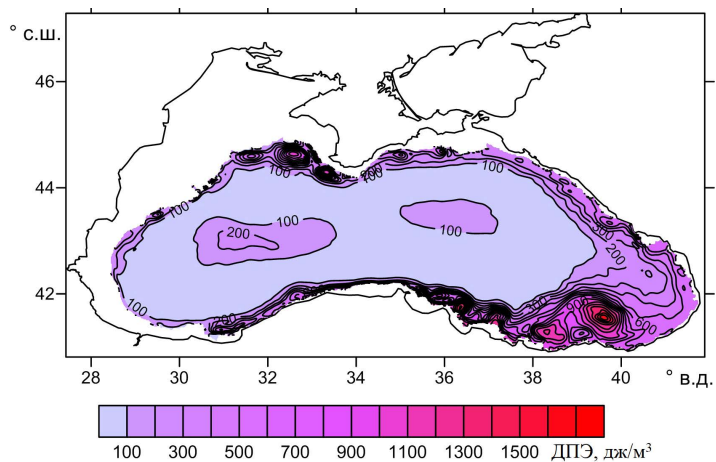
Наблюдаются две отчетливо различающиеся области обмена между кинетической и ДПЭ: центральная часть моря, где этот процесс происходит довольно слабо, и прибрежная область моря, характеризующаяся интенсивной работой силы плавучести. Причем по глубине картины энергообмена качественно различаются. В верхнем 10–30-метровом слое (рис. 4, *a*) основная работа силы плавучести сосредоточена вдоль западного свала глубин, где наблюдаются зоны перехода из ДПЭ в кинетическую энергию и наоборот, что свидетельствует о возможном развитии различного типа неустойчивости на западном свале глубин. На нижележащих горизонтах области интенсивной работы силы плавучести наблюдаются не только у западного берега, но и в восточных областях – около Анатолийского и Кавказского побережий (рис. 4, *b*, *c*). На глубинах 200–300 м в зоне Севастопольского и Батумского антициклонов имеет место четко выраженный переход энергии от кинетической в ДПЭ, что свидетельствует о процессах бароклинной неустойчивости для этого периода времени (рис. 4, *c*).



*a*



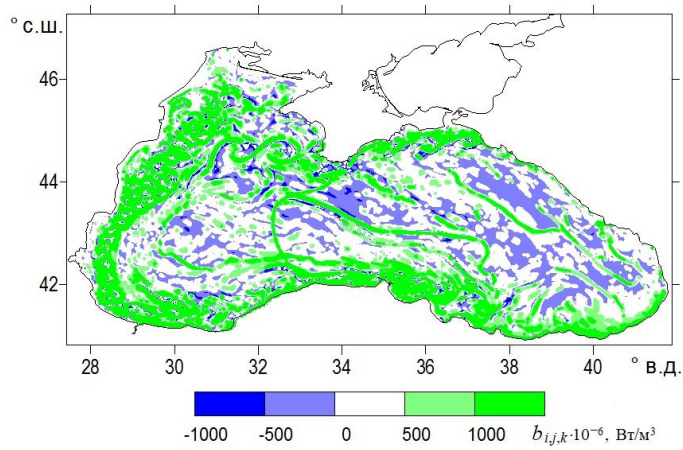
*b*



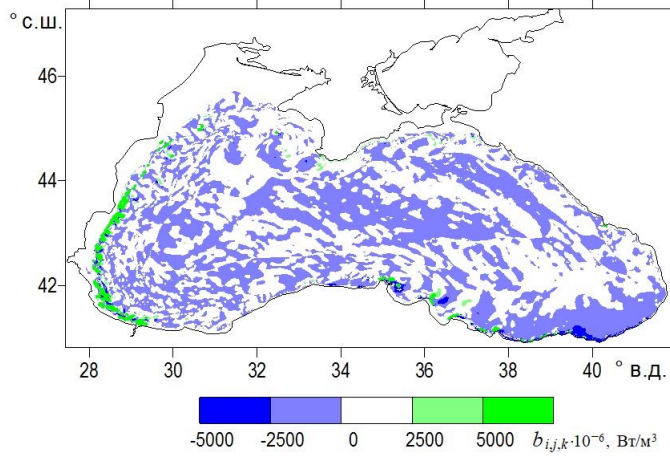
*c*

**Р и с. 3.** ДПЭ (дж/м<sup>3</sup>) на горизонтах 20 (а), 50 (b) и 300 м (с)

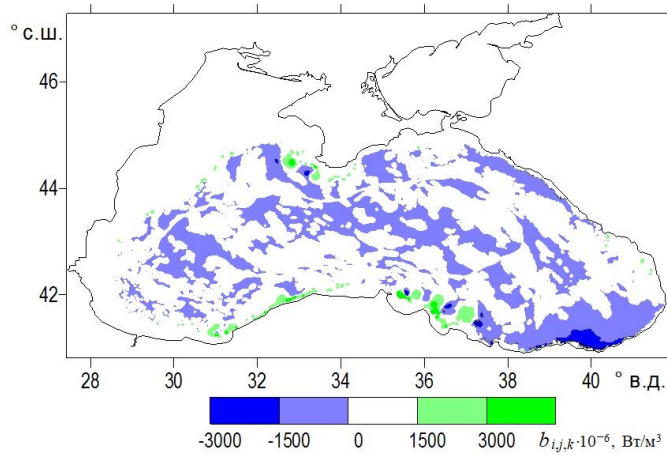
**Fig. 3.** Available potential energy at the 20 (a), 50 (b) and 300 m (c) horizons



*a*

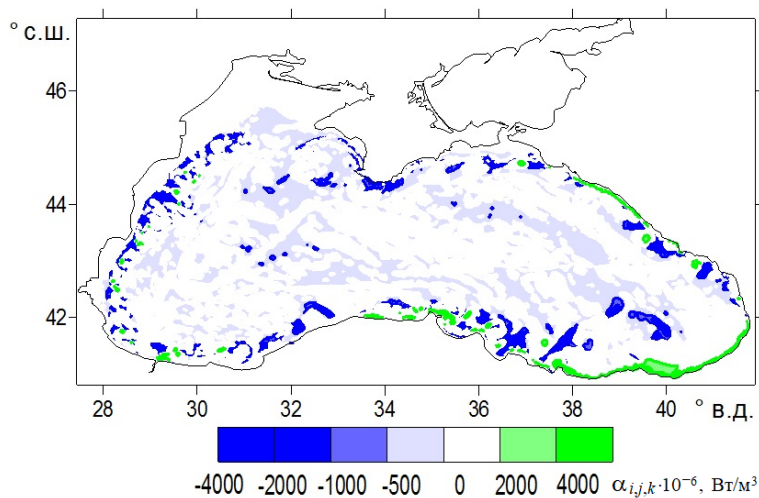


*b*

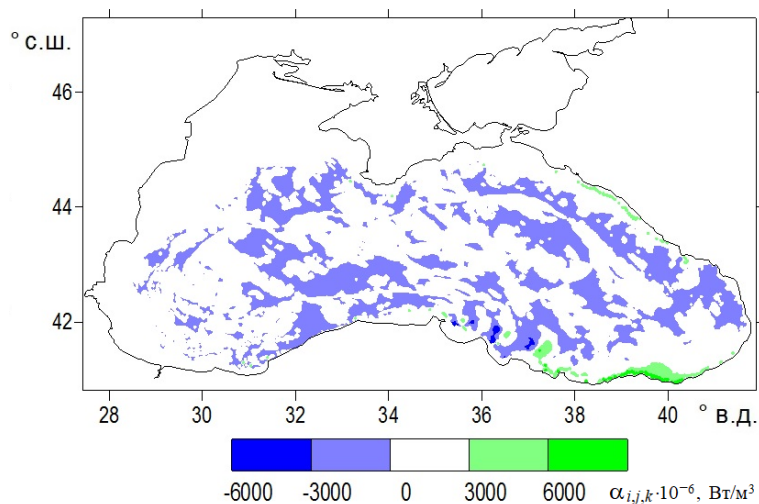


*c*

**Р и с. 4.** Работа силы плавучести на горизонтах 20 (*a*), 50 (*b*) и 300 м (*c*)  
**F i g. 4.** Action of the buoyancy force at the 20 (*a*), 50 (*b*) and 300 m (*c*) horizons  
 МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 38 № 3 2022



*a*



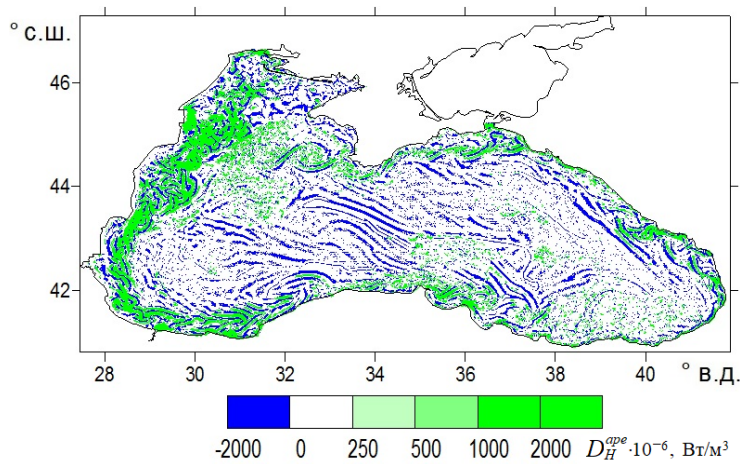
*b*

**Р и с. 5.** Адвекция ДПЭ на горизонтах 50 (*a*) и 300 м (*b*)

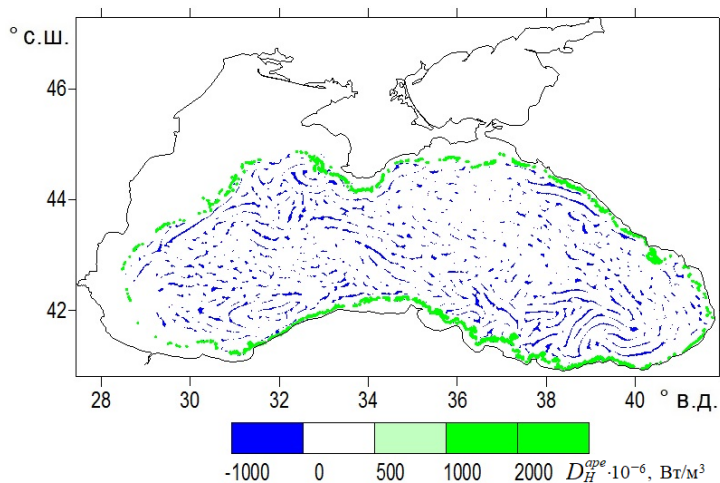
**Fig. 5.** Available potential energy advection at the 50 (*a*) and 300 m (*b*) horizons

Перенос ДПЭ в результате адвекции (рис. 5) наиболее интенсивно происходит в прибрежной зоне моря. В верхнем 50-метровом слое он сосредоточен у западного побережья, в нижних слоях – вдоль Анатолийского берега (рис. 5, *a*). В отличие от работы силы плавучести в области Севастопольского и Батумского антициклонов влияние адвекции мало и довольно однородно по горизонтали, что свидетельствует о незначительной роли адвективных сил в процессе эволюции этих круговоротов, по крайней мере в этот период времени. Ниже горизонта 200 м (рис. 5, *b*) наибольший адвективный перенос имеет место в районе Анатолийского побережья (зона мезомасштабных вихрей) и в области Севастопольского антициклона.

Наибольшая горизонтальная диффузия наблюдается в верхнем слое моря (рис. 6, *a*), что обусловлено двумя факторами – значительными горизонтальными градиентами в поле плотности и вхождением рек, в первую очередь Дуная. Ясно, что по сравнению с центральной частью бассейна вдольбереговая зона характеризуется большим значением диффузионного потока. Особенно ярко это процесс проявляется в глубинных слоях (рис. 6, *b*), где диффузия ДПЭ сосредоточена около боковых границ в виде узкой полосы.



*a*



*b*

**Рис. 6.** Горизонтальная диффузия ДПЭ на горизонтах 5 (*a*) и 300 м (*b*)

**Fig. 6.** Horizontal diffusion of available potential energy at the 5 (*a*) and 300 m (*b*) horizons

Структура вертикальной диффузии ДПЭ определяется в первую очередь потоками тепла, осадков и испарения на поверхности моря. Поэтому наибольшие ее значения наблюдаются в верхнем 20-метровом слое. Ниже значения  $D_V^{ape}$  уменьшаются на порядок.

## Заключение

Для вывода дискретного уравнения скорости изменения ДПЭ использовалась переопределенная сетка, на которой вводились новые неизвестные, связанные дополнительными соотношениями (21), (25), (26). Эти связи были выбраны так, чтобы выполнялись некоторые свойства дифференциальной задачи. Формулы (21) обеспечивают соответствие уравнений (15) и (22), выражения (25), (26) приводят к конечно-разностному уравнению (27), которое включает слагаемое, не присутствующее в дифференциальной постановке и имеющее диффузионный вид. Поскольку оно на порядок меньше физической диффузии, то его можно интерпретировать как дополнительную диффузию, которая, по крайней мере на относительно коротком интервале интегрирования, не влияет на результаты расчета.

Исходя из сказанного, можно утверждать, что задача получения дискретного уравнения для ДПЭ, обладающего теми же характеристиками, что и непрерывный случай, выполнена частично. Необязательно, чтобы ДПЭ на границах бокса принимала вид аппроксимации (26). Можно предположить, что существует подходящий выбор выражения (26), которое позволит обеспечить выполнение основных свойств дифференциального уравнения.

Полученное разностное уравнение (29) в точности соответствует дискретной постановке и поэтому адекватно отражает энергетику разностной задачи. В середине гидрологической зимы в Черном море наибольшие значения ДПЭ наблюдаются в верхнем слое в центральной области моря. Ниже горизонта 100 м картина меняется на противоположную – ДПЭ увеличивается по направлению к берегу, где наблюдается интенсивная мезомасштабная изменчивость. На глубине более 200 м наибольший запас ДПЭ сосредоточен в Севастопольском и Батумском антициклонах. Поэтому для зимнего периода характерно, что запас ДПЭ в верхнем слое моря имеет место в центральной части циклонических круговоротов, на глубине примерно 100 м и более он содержится в области синоптических и мезомасштабных вихрей.

Работа основных сил (плавучести, адвекции и горизонтальной диффузии) сосредоточена в прибрежных областях моря. Таким образом, на скорость изменения ДПЭ в зимний период преобладающим образом влияет вихревая активность на свале глубин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kjellsson J., Zanna L.* The Impact of Horizontal Resolution on Energy Transfers in Global Ocean Models // *Fluids*. 2017. Vol. 2, iss. 3. 45. <https://doi.org/10.3390/fluids2030045>
2. Seasonal variability of eddy kinetic energy in a global high-resolution ocean model / J. K. Rieck // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42, iss. 21. P. 9379–9386. <https://doi.org/10.1002/2015GL066152>
3. *Yang Y., San Liang X.* On the seasonal eddy variability in the Kuroshio Extension // *Journal of Physical Oceanography*. 2018. Vol. 48, iss. 8. P. 1675–1689. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0058.1>
4. The eddy kinetic energy budget in the Red Sea / P. Zhan [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2016. Vol. 121, iss. 7. P. 4732–4747. <https://doi.org/10.1002/2015JC011589>



5. *Stepanov D. V., Diansky N. A., Fomin V. V.* Eddy energy sources and mesoscale eddies in the Sea of Okhotsk // *Ocean Dynamics*. 2018. Vol. 68, iss. 7. P. 825–845. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1167-3>
6. *Lorenz E. N.* Available potential energy and the maintenance of the general circulation // *Tellus*. 1955. Vol. 7, iss. 2. P. 157–167. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v7i2.8796>
7. *Holland W. R.* Energetics of baroclinic oceans // *Numerical models of ocean circulation : proceedings of a symposium held at Durham, New Hampshire, October 17-20, 1972*. Washington : National Academy Press, 1975. P. 168–177.
8. Eddies and the general circulation of an idealized oceanic gyre: a wind and thermally driven primitive equation numerical experiment / A. Robinson [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 1977. Vol. 7, iss. 2. P. 182–207. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1977\)007<0182:EATGCO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1977)007<0182:EATGCO>2.0.CO;2)
9. *Демьшев С. Г.* Энергетика климатической циркуляции Черного моря. Ч. I. Дискретные уравнения скорости изменения кинетической и потенциальной энергий // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 9. P. 65–80.
10. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems // *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 1982. Vol. 20, no. 4. P. 851–875.
11. *Demyshev S. G., Dymova O. A.* Numerical analysis of the Black Sea currents and mesoscale eddies in 2006 and 2011 // *Ocean Dynamics*. 2018. Vol. 68, iss. 10. P. 1335–1352. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1200-6>

*Об авторе:*

**Демьшев Сергей Германович**, главный научный сотрудник, заведующий отделом теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5405-2282**, [demyshev@gmail.ru](mailto:demyshev@gmail.ru)

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.59

DOI: 10.22449/0233-7584-2022-3-256-275

## **Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений: нормативно-правовые аспекты, терминология и классификация (обзор)**

**Н. А. Яицкая<sup>1, 2, ✉</sup>, А. А. Магаева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр  
Российской академии наук», Сочи, Россия*

<sup>2</sup> *Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук,  
Ростов-на-Дону, Россия  
✉ yaitskayan@gmail.com*

Поступила в редакцию 27.12.2021; одобрена после рецензирования 28.02.2022;  
принята к публикации 15.03.2022

### *Аннотация*

*Цель.* Выполнен анализ современного состояния исследований и достижений в области опасных природных и гидрометеорологических явлений и их ансамблей (мультиопасных явлений) на материале статей, опубликованных в профильных рейтинговых международных и российских научных журналах, и монографий.

*Методы и результаты.* Рассмотрены нормативно-правовые документы, регламентирующие терминологию в области опасных и мультиопасных природных и гидрометеорологических явлений, различия в принятой терминологии; существующие классификации мультиопасных гидрометеорологических явлений, методы классификаций и возможные перспективы их использования, пороговые значения опасности и методы их расчета; результаты исследований мультиопасных гидрометеорологических явлений на основе данных натурных наблюдений и глобального реанализа. Отдельное внимание уделено современному этапу развития естественных и точных наук в России, вносящих вклад в предотвращение и прогнозирование опасных гидрометеорологических явлений.

*Выводы.* С увеличением повторяемости опасных природных явлений с начала XXI в. и развитием информационных технологий, таких как создание электронных баз данных, геоинформационных систем, использование спутниковой информации и математического моделирования, появилась возможность анализировать, прогнозировать, оценивать и минимизировать (хоть и в неполной мере) последствия проявлений этих явлений. Показано, что решение проблем прогнозирования, мониторинга и минимизации последствий опасных природных явлений и их сочетаний требует междисциплинарных решений и взаимодействия между всеми заинтересованными сторонами – обществом, властью, наукой, бизнесом. Важно разрабатывать и внедрять планы по интегрированному управлению в регионах, особенно подверженных рискам. Большая проблема, по нашему мнению, заключается в том, что в российской и мировой науке существует большое несоответствие между выводами фундаментальных исследований и решениями, принимаемыми органами власти.

**Ключевые слова:** опасные природные явления, шторм, лед, паводки, геоинформационные системы, математическое моделирование, реанализ, система поддержки принятия решений, планирование, управление риском

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-15-50320.

© Яицкая Н. А., Магаева А. А., 2022

Для цитирования: Яицкая Н. А., Магаева А. А. Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений: нормативно-правовые аспекты, терминология и классификация (обзор) // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 256–275. doi:10.22449/0233-7584-2022-3-256-275

## Ensembles of Hazardous Hydrometeorological Phenomena: Legal and Regulatory Aspects, Terminology and Classification (Review)

N. A. Yaitskaya<sup>1,2,✉</sup>, A. A. Magaeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal research centre the Subtropical scientific centre of RAS, Sochi, Russia

<sup>2</sup> Federal research centre the Southern scientific centre of RAS, Rostov-on-Don, Russia

✉ yaitskayan@gmail.com

### Abstract

**Purpose.** The article represents the analysis of current state of research and achievements in the field of hazardous natural and hydrometeorological phenomena, and their ensembles (multi-hazardous phenomena) based on the papers published in the specialized international and Russian scientific journals and monographs.

**Methods and Results.** Normative legal documents regulating terminology in the field of hazardous and multi-hazardous natural and hydrometeorological phenomena, differences in the adopted terminology; existing classification of the multi-hazardous hydrometeorological phenomena, classification methods and possible prospects for their application, hazard threshold values and the methods for their calculation; results of the studies of multi-hazardous hydrometeorological phenomena based on the field observations data and global reanalysis are considered. Special attention is paid to the current stage of development of natural and exact sciences in Russia which contribute to preventing and forecasting of hazardous hydrometeorological phenomena.

**Conclusions.** With increase in the recurrence of hazardous natural phenomena since the beginning of the 21<sup>st</sup> century and the development of information technologies, such as creation of electronic databases, geoinformation systems, application of satellite information and mathematical modeling, it became possible to analyze, forecast, evaluate and minimize (albeit incompletely) the consequences of such phenomena. It is shown that solution of the problems including forecasting, monitoring and minimizing the consequences of hazardous natural phenomena and their combinations requires interdisciplinary solutions, on the one hand, and interaction between all the stakeholders – society, government, science and business, on the other. It is important to develop and implement an integrated management in the regions that are particularly at risk. A significant problem, in our opinion, consists in the fact that both in Russian and world science there is a large gap between the fundamental research and the decisions taken by the authorities.

**Keywords:** hazardous natural phenomena, storm, ice, flood, geographic information system, mathematical modeling, reanalysis, decision support system, planning, risk management

**Acknowledgements:** the study was carried out with the RFBR financial support, project No. 20-15-50320.

**For citation:** Yaitskaya, N.A. and Magaeva, A.A., 2022. Ensembles of Hazardous Hydrometeorological Phenomena: Legal and Regulatory Aspects, Terminology and Classification (Review). *Physical Oceanography*, 29(3), pp. 237-256. doi:10.22449/1573-160X-2022-3-237-256

## Введение

Согласно специальному докладу «Управление рисками экстремальных явлений и бедствий для содействия адаптации к изменению климата» Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), в мире приблизительно с 1950 г. наблюдается увеличение повторяемости природных опасностей, причиной которых является изменение климата. С 1998 по 2017 г., по информации из базы данных о чрезвычайных ситуациях (*Emergency Events Database*), стихийные бедствия повлекли за собой экономические потери примерно в 3 трлн долларов и 1,3 млн человеческих жертв, пострадали более 4,4 млрд человек <sup>1</sup>.

На территории России увеличение числа опасных явлений (ОЯ), нанесших значительный ущерб экономике и населению, наблюдается с середины 1990-х гг. С начала 2000-х гг. число и масштабность природных катастроф возросли примерно в пять раз, а их опасность – в девять раз [1]. При этом ОЯ стали более интенсивными и разрушительными, чем ранее, и влекут за собой техногенные чрезвычайные ситуации. Ежегодный ущерб от воздействия опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений в нашей стране составляет не менее 30–60 млрд рублей <sup>2</sup>.

Последствия роста числа стихийных бедствий, связанных с климатическими изменениями <sup>1</sup>, могут усугубляться на фоне увеличения периодичности опасных явлений в отдельных регионах и их более экстремальных проявлений [2], роста и так большой доли проживающего в зонах возникновения опасных явлений населения мира. Прогнозируется, что к 2050 г. население Земли достигнет 9,2 млрд человек [3], и растущая изменчивость окружающей среды в связи с более высокой частотой и серьезностью экстремальных явлений, вероятно, станет важным последствием изменения климата [4].

В этом контексте возрастает актуальность разработки и принятия на мировом уровне единого подхода к оценке климатических изменений в различных пространственных масштабах с учетом множественных рисков (мультириски) (например, [5, 6]). В специальном отчете об экстремальных явлениях и стихийных бедствиях <sup>3</sup> МГЭИК указывает, что учет мультиопасных явлений позволит обеспечить принятие более эффективных мер по сокращению негативных последствий и адаптации жизни людей в условиях возможных катастроф.

---

<sup>1</sup> EM-DAT: The International Disaster Database : [site]. URL: [www.emdat.be/](http://www.emdat.be/) (date of access: 15.04.2022).

<sup>2</sup> Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета) / Под ред. В. М. Катцова, Б. Н. Порфирьева ; [Е. И. Хлебникова, Е. М. Акентьева, С. Ю. Гаврилова и др.]. Санкт-Петербург ; Саратов : Амирит, 2020. 120 с. URL: <http://cc.voikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/dokladRGM.pdf> (дата обращения: 15.05.2022).

<sup>3</sup> Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation : special report of the intergovernmental panel on climate change / Eds. C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker [et al.]. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. 582 p. URL: <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/> (date of access: 19.04.2022).

На глобальном и европейском уровнях в последние десятилетия возрос интерес к оценке множественных рисков, особенно в отношении инициатив, связанных с оценкой рисков возникновения различных ОЯ природного и техногенного характера <sup>4</sup>, к анализу мультиопасных <sup>5</sup> явлений [7, 8].

Концепция мультиопасных явлений впервые была предложена в 1992 г. на конференции в Рио-де-Жанейро <sup>6</sup>. Затем в Йоханнесбургском Плане выполнения решений Всемирной встречи на высшем уровне по устойчивому развитию в 2002 г. <sup>7</sup> был рассмотрен комплексный подход к управлению рисками бедствий и снижению рисков при возникновении мультиопасных явлений. Далее эти феномены обсуждались на заседаниях в Хёго (2005 г.) <sup>8</sup> и Сендае (2015 г.) <sup>9</sup>. Учет множественных рисков был определен как важный элемент различных документов на европейском и глобальном уровнях [9, 10].

В зарубежной научной литературе можно встретить термин *multi-hazards* – мультиопасные явления (ансамбли опасных явлений). Исследуются сами явления, их последствия, уделяется больше внимания разработке планов эвакуации, взаимодействия властей и местных жителей, также оценке социально-экономических последствий таких событий. При этом многие авторы отмечают отсутствие универсальной терминологии для всего научного сообщества. В настоящее время нет четкого определения терминов «мультириск» и «мультиопасность» ни в научной литературе, ни в практической деятельности; принятие решений в условиях мультириска – зарождающаяся область исследования [11].

Вместе с тем, поскольку изменение климата, вероятно, изменит пороги опасности, частоту, период повторяемости и пространственное распределение

---

<sup>4</sup> ESPON Project 1.3.1: The spatial effects and management of natural and technological hazards in general and in relation to climate change [ESPON HAZARD PROJECT] // ESPON : [site]. URL: <https://www.espon.eu/programme/projects/espon-2006/thematic-projects/spatial-effects-natural-and-technological-hazards> (date of access: 05.05.2022) ; MATRIX Framework for multi-risk assessment / N. Farokh [et al.] // New Multi-Hazard and Multi-Risk Assessment Methods for Europe / W. Aspinall [et al.]. Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences, 2014. P. 31–36. (MATRIX Reference Reports). URL: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/11194/1/XO-14-026.pdf> (date of access: 12.05.2022) ; FEMA.gov : An official website of the U.S. Department of Homeland Security. URL: <http://www.fema.gov/> (date of access: 05.05.2022).

<sup>5</sup> Garcia-Aristizabal A., Marzocchi W. Dictionary of the terminology adopted. Deliverable 3.2. MATRIX project (Contract n 265138). 2012 ; Garcia-Aristizabal A., Marzocchi W. Bayesian multi-risk model: demonstration for test city researchers. Deliverable 2.13. CLUVA project (Contract n265137). 2012.

<sup>6</sup> Доклад Конференции Организации Объединенных Наций по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 3–14 июня 1992 года). Том 1 : Резолюции, принятые на Конференции. Нью-Йорк : ООН, 1993. P. 3–14. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/160453> (дата обращения: 01.05.2022).

<sup>7</sup> Доклад Всемирной встречи на высшем уровне по устойчивому развитию. Нью-Йорк : ООН, 2002. 212 с. Нью-Йорк : URL: <https://docs.cntd.ru/document/901893000> (дата обращения: 01.05.2022).

<sup>8</sup> Доклад Всемирной конференции по уменьшению опасности бедствий Кобе, Хиого, Япония, 18–22 января 2005 года. Нью-Йорк : ООН, 2005. 64 с. URL: [https://www.preventionweb.net/files/1037\\_finalreportwcdrrussian1.pdf](https://www.preventionweb.net/files/1037_finalreportwcdrrussian1.pdf) (дата обращения: 01.05.2022).

<sup>9</sup> Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. Нью-Йорк : ООН, 2015. 40 с. URL: [https://www.preventionweb.net/files/43291\\_russiansendaiframeworkfordisasterri.pdf](https://www.preventionweb.net/files/43291_russiansendaiframeworkfordisasterri.pdf) (дата обращения: 01.05.2022).

различных климатических и природных переменных<sup>10</sup>, необходимо учитывать вклад климатических изменений в будущих решениях. Очень немногие методологии прогнозирования будущих рисков и принятия решений опираются на сценарии изменения климата, учитывающие будущие экологические риски и стихийные бедствия. При этом отсутствие научно обоснованного подхода к оценке будущих изменений климата с учетом мультиопасных природных явлений и множественных рисков может привести к дезадаптации (т. е. к увеличению уязвимости или подверженности другим видам опасностей) [6].

Несмотря на развитие различных систем, использующих технологии обучения и прогнозирования смягчения последствий стихийных бедствий, эффективное прогнозирование стихийных бедствий и управление рисками их возникновения по-прежнему остается проблемой во всем мире.

В настоящей работе на основе анализа отечественной и зарубежной научной литературы, изданной с 2005 по 2021 г., рассмотрены:

- 1) нормативно-правовые документы, регламентирующие терминологию в области мультиопасных природных и гидрометеорологических явлений;
- 2) существующие классификации мультиопасных гидрометеорологических явлений, методы выполнения классификаций, пороговые значения опасности и методы их расчета;
- 3) исследования мультиопасных гидрометеорологических явлений на основе результатов натурных наблюдений.

## 1. Материалы и методы

Для работы были отобраны научные публикации из полнотекстовой коллекции электронных журналов издательств *Elsevier*, *Springer* и научной электронной библиотеки *E-Library*. Поиск осуществлялся на платформах этих издательств и в международных научных базах данных *Scopus* и *Web of Science* по ключевым словам на английском и русском языках «опасные природные явления», «мультиопасные явления», «шторм», «нагон», «паводок», «лед», «реанализ», «база данных», «система поддержки принятия решений», «математическое моделирование», «планирование», «правительство», «управление риском», «уязвимость». Поиск охватывал временной период с 2005 по 2021 г. Было выбрано 311 статей и монографий на английском языке и 49 – на русском.

Основной объем информации получен из журналов: «Океанология», «Водные ресурсы», «Метеорология и гидрология», «*Progress in Oceanography*», «*Mathematical Modeling*», «*Oceanologia*», «*Ocean Modeling*», «*Journal of Marine Systems*», «*Ocean and Coastal Management*», «*Marine Policy*», «*Coastal Engineering*», «*Cold Region Science and Technology*», «*International Journal of Disaster Risk Reduction*», «*Quaternary Science Reviews*», «*Environmental Impact Assessment Review*», «*Weather and Climate Extremes*», «*Journal of Environmental Management*» и др. Наибольшее количество научных статей найдено по оценке

---

<sup>10</sup> Summary for policymakers / C. B. Field [et al.] // Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK ; New York, USA : Cambridge University Press, 2014. P. 1–32. URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf) (date of access: 19.04.2022).

риска и управлению рисками, системам предупреждения и прогнозирования опасных природных явлений (ОПЯ), наводнениям, штормовому волнению. В литературный обзор вошло 224 научных работы на английском языке и 32 – на русском.

## 2. Терминология в области мультиопасных природных и гидрометеорологических явлений

Вопросами опасных явлений как природного, так и техногенного характера озабочены ведущие мировые организации – МГЭИК (IPCC), Всемирная метеорологическая организация (ВМО), Организация объединенных наций (ООН). Решение проблем, связанных с неупорядоченностью терминологии, стало приоритетной задачей Управления ООН по снижению риска бедствий (UNDRR, ранее UNISDR) после принятия Хиогской рамочной программы действий 2005–2015<sup>8</sup> и документа «2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction»<sup>11</sup>. Впоследствии Сендайская рамочная программа действий 2015–2030<sup>9</sup> дополнила предыдущие публикации и охватила вопросы, касающиеся возникновения не только мелко- и крупномасштабных опасностей с различной частотой и скоростью распространения, вызываемых природными факторами или антропогенной деятельностью, но и связанных с ними экологических, техногенных и биологических угроз и рисков [12].

Согласно международному стандарту ISO 31000:2018, риск определяется как «влияние неопределенности в отношении объекта» или «комбинация вероятности того, что событие произойдет, и его исхода». Вероятность того, что событие произойдет, зависит от источника бедствия и его свойств, а результат связан с уязвимостью, которая влияет на масштаб ущерба и способность уменьшить ущерб.

В ходе выполнения настоящего исследования и анализа литературы было найдено множество различных определений для одних и тех же процессов и явлений (см. приложение). Они не противоречат друг другу, но нетрудно заметить порой значимые различия.

На территории Российской Федерации основные понятия, термины и определения, касающиеся опасных природных процессов или явлений, а также действия по их предупреждению, прогнозированию и ликвидации регламентируются Федеральным законом от 19 июля 1998 г. № 113-ФЗ «О гидрометеорологической службе»; Федеральным законом от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»; ГОСТ Р 22.0.03-97 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения».

В каждом из нормативных документов определение опасного явления отличается от других. Так, Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ (ред. от 02.07.2013)<sup>12</sup> определяет **опасные природные процессы и явления** как «землетрясения, сели, оползни, лавины, подтопление территории, ураганы, смерчи,

<sup>11</sup> Терминологический глоссарий UNISDR. Женева, Швейцария : ООН, 2009. 43 с. URL: [https://www.preventionweb.net/files/7817\\_UNISDRTerminologyRussian.pdf](https://www.preventionweb.net/files/7817_UNISDRTerminologyRussian.pdf) (дата обращения: 01.05.2022).

<sup>12</sup> Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 г. (ред. от 02.07.2013) // Собрание законодательства РФ. 2010. 04 янв. Вып. 1. Ст. 5. URL: <https://www.szrf.ru/szrf/doc.php?nb=100&issid=1002010001000&docid=5> (дата обращения: 05.05.2022).

эрозия почвы и иные подобные процессы и явления, оказывающие негативные или разрушительные воздействия на здания и сооружения». В соответствии с Федеральным законом от 02.02.2006 г. № 21-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О гидрометеорологической службе», **опасное природное явление** – это «гидрометеорологическое или гелиогеофизическое явление, которое по интенсивности развития, продолжительности или моменту возникновения может представлять угрозу жизни или здоровью граждан, а также может наносить значительный материальный ущерб». В соответствии с ГОСТ Р 22.0.03-97 **опасное природное явление** – «событие природного происхождения или результат деятельности природных процессов, которые по своей интенсивности, масштабу распространения и продолжительности могут вызвать поражающее воздействие на людей, объекты экономики и окружающую природную среду»<sup>13</sup>. В ГОСТ Р 22.0.03-97 дано также определение **стихийного бедствия** – это «разрушительное природное и (или) природно-антропогенное явление или процесс значительного масштаба, в результате которого может возникнуть или возникла угроза жизни и здоровью людей, произойти разрушение или уничтожение материальных ценностей и компонентов окружающей природной среды».

В РД 52.04.563-2013 к **гидрометеорологическим ОПЯ** относятся отдельные гидрометеорологические явления или их сочетания, которые могут представлять угрозу жизни или здоровью граждан, а также могут нанести материальный ущерб<sup>14</sup>.

### 3. Классификации мультиопасных гидрометеорологических явлений

В широком смысле ОЯ разделяются по происхождению, продолжительности, масштабу, последствиям. Наибольшее количество вариантов типологий – по происхождению (таблица). Опасности могут быть естественными (землетрясение, сейсмические воздействия, наводнения и т. д.), технологическими (обрушение плотины, химический взрыв и т. д.), вызванными антропогенными факторами (удаление растительности, разработка полезных ископаемых, осушение и т. д.). Различные ОЯ могут угрожать одним и тем же элементам, подверженным риску. Некоторые авторы отмечают, что по своей сути все опасности являются антропогенными, поскольку уровень опасности измеряется в сумме ущерба для человека [12].

Опасности могут быть одиночными, последовательными (опасность, вызванная другим явлением или эффект домино), комбинированными (мультиопасности) по последствиям; могут увеличиваться или уменьшаться в зависимости от первоначального события; могут быть связаны в пространстве или по времени; могут увеличивать уязвимость элементов, подверженных риску. Они могут происходить как последовательно, так и параллельно [13].

---

<sup>13</sup> Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения : ГОСТ 22.0.03-97 ; ГОСТ Р 22.0.03-95. Введ. 1996-07-01. Минск : ИПК Издательство стандартов, 2000. 16 с.

<sup>14</sup> Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями : РД 52.04.563-2013. СПб., 2013. 52 с.



Кроме того, опасности можно разделить на быстро возникающие интенсивные события ограниченной продолжительности (короткие, резкие потрясения, такие как оползни, иногда называемые острыми опасностями (*acute hazards*)) и медленно возникающие, широко распространенные явления, которые часто затрагивают большие территории в течение более длительных периодов времени (например, засуха, иногда называемая хронической опасностью (*chronic hazards*)).

**Классы опасных явлений по происхождению  
согласно различным источникам  
Classes of natural hazards by origin according to various sources**

Классы / Classes	Источники / Sources						Отчет <sup>16</sup> / Report <sup>16</sup> [17, 18]
	Отчет <sup>15</sup> / Report <sup>15</sup>	Отчет <sup>16</sup> / Report <sup>16</sup>	[14]	[15]	[16]	[17]	
Антропогенные / Anthropogenic			X		X		
Биологические / Biological	X		X			X	X
Внеземные / Extraterrestrial							X
Геофизические / Geophysical	X	X					X
Гибридные / Смешанные / Hybrid / Mixed				X	X		
Гидрологические / Hydrological		X	X				X
Глобальные / Global						X	
Климатические / Climatic	X	X	X				X
Метеорологические / Meteorological	X	X					X
Природные / Natural				X	X	X	
Социальные / Social				X		X	
Тектонические / Tectonic			X				
Технологические / Technological				X		X	
Физиографические / (антропогенные и природные) / Physiographic (anthropogenic and natural)			X				
Химические / Chemical			X				

Некоторые авторы считают разделение ОПЯ по различным признакам формальным и отмечают, что их невозможно встретить в мире в чистой форме [19]. Опасности различных типов могут влиять друг на друга, и их лучше описывать как квазиестественные или смешанные (гибридные) опасности. Социальные и технологические опасности, оказывающие влияние на природную среду, порождают квазиестественные опасности. Гибридные опасности являются продуктом взаимосвязи между социальными и технологическими явлениями, в то время как экологические опасности являются результатом взаимодействия между тремя элементами (природными, социальными и технологическими) [15].

<sup>15</sup> Guha-Sapir D., Hoyois P. Existing databases on disaster impacts // Measuring the human and economic impact of disasters : report. London : UK Government Office of Science, 2012. Chapter 2. P. 6–13. URL: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/286966/12-1295-measuring-human-economic-impact-disasters.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/286966/12-1295-measuring-human-economic-impact-disasters.pdf) (date of access: 24.05.2022).

<sup>16</sup> Peril Classification and Hazard Glossary : DATA project report no. 1. Beijing : IRDR, 2014. URL: [https://irdrinternational.org/uploads/files/2020/08/2h6G5J59fs7nFgoj2z7hNAQgLCgLG55evfT8jBNi/IRDR\\_DATA-Project-Report-No.-1.pdf](https://irdrinternational.org/uploads/files/2020/08/2h6G5J59fs7nFgoj2z7hNAQgLCgLG55evfT8jBNi/IRDR_DATA-Project-Report-No.-1.pdf) (date of access: 24.05.2022).

Каждая опасность характеризуется географическим положением, интенсивностью, частотой и вероятностью. В каждой стране существуют отдельные классификации в зависимости от преобладающих опасностей, разработаны градации ОЯ (пороговые значения) по степени их воздействия и методики дифференцирования таких явлений. Развиваются также методы классификации и оценки рисков различных опасностей.

Большинство методологий классификаций ОПЯ являются проблемно ориентированными и направлены на оценку последствий на национальном, региональном или местном уровне. Их применение требует обработки и анализа огромных массивов данных. В большинстве методов применяются исторические данные (например, проект *ESPON*<sup>17</sup>, см. работу [11]) и картографическая информация, отражающие потенциально подверженные риску компоненты среды и их характеристики (например, [20, 21]. При этом сценарии будущих изменений климата не рассматриваются [6].

#### 4. Методы классификации ОПЯ

В рамках европейского проекта *ARMONIA*<sup>18</sup> (*Applied multi Risk Mapping of Natural Hazards for Impact Assessment*) (2004–2007 гг.), целью которого была разработка единой методологии для создания карт различных типов опасностей и рисков, а также инструментов поддержки принятия решения для управления рисками, был разработан метод классификации интенсивности опасности (низкая, средняя и высокая), что позволяет сравнить «важность» опасностей и определить последствия при пространственном планировании.

В Швейцарии применяют классификационный подход к оценке опасностей. На первом этапе определяют тип опасностей, их величину (высокая, средняя, низкая) и вероятность (высокая, средняя, низкая и очень низкая) для конкретного района. Затем выполняется классификация результатов в соответствии с диаграммой величина – вероятность (диаграмма уровня опасности). Итогом является карта опасностей с указанием уровня опасности [22]. Авторы работы [23] для оценки опасности также используют метод классификации, но уровень опасности в зонах перекрытия определяют не по максимуму перекрывающихся классов, а с помощью матрицы.

Многокритериальный анализ решений (*Multiple-Criteria Decision Analysis*, сокр. *MCDCA*) – широко применяемый метод принятия решений при наличии нескольких критериев. Его используют для комплексного планирования землепользования в районах, подверженных оползням [24], для оценки уязвимости территорий к засухе [25], построения зон затоплений [26], оценки природных рисков [27].

Методика определения порядка предпочтения по сходству с идеальным решением (*The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*, сокр. *TOPSIS*) используется для оценки удаленности показателей от изначально

---

<sup>17</sup> ESPON Project 1.3.1: The spatial effects and management of natural and technological hazards in general and in relation to climate change [ESPON -HAZARD PROJECT]. URL: <https://www.espon.eu/programme/projects/espon-2006/thematic-projects/spatial-effects-natural-and-technological-hazardshttps://www.espon.eu/> (date of access: 05.0305.20212022).

<sup>18</sup> URL: [http://www.eurosfairer.prd.fr/7pc/doc/1271840032\\_armonia\\_fp6\\_multiple\\_risks.pdf](http://www.eurosfairer.prd.fr/7pc/doc/1271840032_armonia_fp6_multiple_risks.pdf) (date of access: 12.05.2022).

определенных идеальной и антиидеальной точек по отдельности, затем эти два показателя преобразуются в одну общую оценку [28]. В работе [29] метод *TOPSIS* применен для выявления потенциальных стихийных бедствий в городе Бендер-Аббас, Иран. Интеграция метода в ГИС позволила авторам исследования [30] создать карты опасности и риска землетрясений в Стамбуле, а авторам работы [31] – оценить уязвимость от наводнений в Южной Корее и т. д.

Концепция «Движущие факторы – нагрузки – состояние – воздействие – реакция» (*Driving forces – Pressure – State – Impact – Response*, сокр. *DPSIR*) была принята Европейским агентством по окружающей среде (ЕАОС) в 1999 г. Этот метод предназначен для выявления причинно-следственных связей и систематизации информации с целью решения проблем в сфере окружающей среды и рассматривает социально-экономические и природные системы в тесной взаимосвязи <sup>19</sup>. С помощью этого метода выполнен анализ риска ОПЯ в прибрежных районах [32], проанализированы процессы эрозии, вызванные штормами и наводнениями [33].

Колесо прибрежных опасностей (*Coastal Hazard Wheel*, сокр. *CHW*) – система классификации, разработанная для оценки и управления мультиопасными природными явлениями на прибрежных территориях. В основе системы – наиболее важные биогеофизические компоненты, которые принимаются общими в пределах конкретного участка прибрежной среды [34]. Метод применяют для оценки эрозии на побережье Мальты [35] и Карибского побережья Колумбии [36], нарушения прибрежных экосистем Джибути [34].

Следует отметить, что в России разрабатываемые классификации не имеют специальных названий, их можно идентифицировать только по авторскому коллективу и ни одна из них не нашла широкого применения. В научной литературе авторы при описании ОЯ зачастую не опираются на общероссийскую классификацию Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) и МЧС. Между тем Росгидромет определил типовой перечень ОПЯ с конкретными количественными характеристиками опасности, составленный с учетом рекомендаций ВМО <sup>14</sup>. Для каждого субъекта Российской Федерации перечень и пороги опасности варьируются. На основании этого перечня территориальные органы разрабатывают региональные перечни и критерии ОПЯ с учетом природно-климатических особенностей и хозяйственно-экономических условий.

## 5. Индексы

Для комплексной оценки последствий ОПЯ применяются различные индексы:

- индекс аридности (соотношение количества осадков к потенциальной эвапотранспирации) – используется для оценки изменения климата в отдельных районах;
- нормализованный разностный индекс растительности (*NDVI*) – для оценки количества фотосинтетически активной биомассы;
- тепловой индекс (*HI*), объединяющий температуру и влажность воздуха;

---

<sup>19</sup> Стратегический подход к мониторингу и оценке трансграничных рек, озер и подземных вод. Нью-Йорк ; Женева : ООН, 2006. 32 с. URL: [https://unece.org/DAM/env/water/publications/documents/SMA\\_r.pdf](https://unece.org/DAM/env/water/publications/documents/SMA_r.pdf) (дата обращения: 12.05.2022). МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 38 № 3 2022 265

– индекс экологической эффективности (EPI) – метод количественной оценки и сравнительного анализа показателей экологической политики государств мира и др.;

– универсальный индекс термического климата (*UTCI*), введенный в 1994 г., учитывает температуру по сухому термометру, относительную влажность, солнечную радиацию и скорость ветра и считается эталонной температурой окружающей среды [37];

– физиологическая эквивалентная температура (*PET*) – один из наиболее часто используемых показателей для измерения теплового стресса на открытом воздухе [38];

– температура влажного шарика психрометра (*WBGT*) – предложена К. Яглу и Д. Минард (1957 г.) в качестве наиболее часто используемого показателя теплового стресса [39]. Четыре параметра (температура по сухому термометру, относительная влажность воздуха, скорость ветра и тепловое излучение) учитываются при расчете этого индекса, что делает его более точным по сравнению с другими простыми тепловыми индексами;

– индекс риска стихийных бедствий (*Disaster Risk Index*, сокр. *DRI*) отслеживает эволюцию риска [40]: для каждой зоны выявляются взаимосвязи по типам опасности в соответствии со степенью воздействия, относительной уязвимостью и риском<sup>20</sup>. В рамках *DRI* уязвимость рассматривается как фактор, который описывает, почему люди, находящиеся в одном и том же состоянии, могут подвергаться большему или меньшему риску [40].

## **6. Методы оценки рисков мультиопасных природных явлений**

Концепция мультиопасных явлений связана с анализом различных соответствующих опасностей, триггерных и каскадных эффектов, угрожающих одним и тем же подверженным воздействию компонентам среды с временным совпадением или без него [9].

Термин «уязвимость» впервые появился в 1970-х гг.<sup>20</sup>, когда уязвимость была указана как истинная причина катастроф. Определение уязвимости для ОПЯ может быть применено к любой системе, которая взаимодействует с обществом. Не существует набора конкретных уязвимостей – есть только уязвимость, на которую влияют различные факторы (человеческие смерти, финансовые потери, качество жизни населения и др.). Отчасти уязвимость для ОЯ определяется социальной уязвимостью людей. Бедные или развивающиеся сообщества несут больший ущерб от стихийных бедствий из-за экономических и политических ограничений, ухудшения состояния окружающей среды [41].

Методологии оценки риска мультиопасных явлений выполняют агрегирование опасностей, оценку уязвимости [42], присвоение баллов и весов выявленным классам [21]. Результаты позволяют качественно классифицировать риск множественных опасностей.

---

<sup>20</sup> Reducing disaster risk: a challenge for development : a global report / Ed. M. Pelling. New York : Bureau for Crisis Prevention and Recovery, 2004, 161 p. URL: <https://www.undp.org/publications/reducing-disaster-risk-challenge-development> (date of access: 05.05.2022).

В проекте *MATRIX*<sup>21</sup> предлагаются три различных метода для описания и количественной оценки взаимодействий опасных явлений: дерево событий, байесовские сети и моделирование методом Монте-Карло. Отдельные риски в рамках оценки множественных рисков вычисляются с использованием общей единицы измерения (например, потеря жизней, экономические потери) (см. работы [11, 20]). Это позволяет проводить прямое сравнение и агрегирование различных видов рисков. В результате применения обоих подходов выделяются области, подверженные различным общим классам риска (например, [7, 21]).

Для оценки риска мультиопасных природных явлений применяется соответственно метод оценки риска мультиопасных природных явлений (*Multi-Hazard Risk Assessment*, сокр. *MHRA*). Основным преимуществом *MHRA* является то, что он объединяет различные типы опасностей в единую систему для совместной оценки [20], учитывает параметры каждой природной опасности (вероятность, частота и величина), их взаимодействие и взаимосвязи (например, одна опасность может повторяться все время; разные опасности могут возникать независимо в одном и том же месте; различные опасности могут возникать в зависимости от одного и того же места) [20].

## **7. Исследования мультиопасных гидрометеорологических явлений на основе результатов натуральных наблюдений**

ОПЯ, их повторяемость, закономерности возникновения и развития, возникающие последствия изучаются на основе различных исторических источников (личные архивы, СМИ, архивы страховых компаний), результатов натуральных наблюдений, данных дистанционного зондирования Земли, результатов математического моделирования. Данные наблюдений об ОПЯ представляют особый интерес, так как содержат уникальную информацию о произошедших событиях. При этом требуется особое внимание к контролю корректности значений ввиду изменения методик измерений на протяжении всего периода метеонаблюдений и неоднократного воспроизведения.

Некоторые авторы в своих работах дают обширный обзор существующих методов анализа опасных и мультиопасных природных явлений и подходов к нему и выделяют следующие основные проблемы: 1) различие характеристик процессов, затрудняющее сравнение нескольких опасностей, и 2) наличие отношений и взаимодействий между опасностями. ВМО создала Глобальную рамочную основу для климатического обслуживания (*Global Framework for Climate Services*, сокр. *GFCS*), которая координирует по всему миру действия по применению инструментов климатического обслуживания, повышению их качества и количества, а также по определению различных индексов, например индексов изменения климата от группы экспертов<sup>22</sup> *CCL/WCRP/JCOMM* [43].

---

<sup>21</sup> *MATRIX Framework for multi-risk assessment / N. Farrokh [et al.] // New Multi-Hazard and Multi-Risk Assessment Methods for Europe : MATRIX Reference Reports / W. Aspinall [et al.].* Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences, 2014. P. 31–36. URL: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/11194/1/XO-14-026.pdf> (date of access: 12.05.2022).

<sup>22</sup> Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) // WCRP : [site]. URL: <https://www.wcrp-climate.org/etccdi> (date of access: 12.05.2022) ; Expert Team on Sector-Specific Climate Indices (ET-SCI) // WMO : [site]. URL: <https://public.wmo.int/en/events/meetings/expert-team-sector-specific-climate-indices-et-sci> (date of access: 12.05.2022).

## Базы данных

На глобальном уровне Всемирный банк [5] и Мюнхенское перестраховочное общество *Munich Re Group* <sup>23</sup> проводят крупномасштабный анализ стихийных бедствий, визуализируя горячие точки с помощью простых индексов риска возникновения различных опасностей [6].

В Российской Федерации мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды осуществляет Росгидромет. В его обязанности входит также выпуск экстренной информации об ОПЯ, фактических и прогнозируемых резких изменениях погоды, загрязнении окружающей среды, которые могут угрожать жизни и здоровью населения и наносить ущерб природе. Ежегодно информация о произошедших опасных явлениях публикуется в печатных изданиях Росгидромета. Результаты мониторинга ОПЯ передаются в автоматизированную базу данных об ОЯ и неблагоприятных условиях погоды «Сведения об опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях, которые нанесли материальный и социальный ущерб на территории России», которая ведется с 1997 г. (пополняется ежедневно) ВНИИГМИ – МДЦ и является официальной в системе Росгидромета. В базе данных собраны сведения о метеорологических, гидрологических и агрометеорологических ОЯ, нанесших ущерб экономике и населению.

Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) предоставляет данные об ОГЯ в виде приложения «Стихийные бедствия». Информация предоставлена на основе вышеупомянутой базы данных ВНИИГМИ – МДЦ. Существуют также локальные базы данных, такие как, например, ГИС «Опасные природные явления Воронежской области», база данных опасных явлений погоды Пермского края.

Международная база данных о катастрофах *EM-DAT* была создана при поддержке Всемирной организации здравоохранения (*World Health Organisation*, сокр. *WHO*) и правительства Бельгии и предоставляет информацию о воздействии стихийных бедствий на человека, например о количестве убитых, раненых или пострадавших, оценки экономического ущерба.

Европейская база данных о штормах (*European Severe Weather Database*, сокр. *ESWD*) собирает и проверяет отчеты о пыли, песке или парах, наблюдениях за торнадо, порывах ветра, сильном граде, сильном дожде и снегопаде, сильных порывах ветра, разрушительных ударах молний и лавинах по всей Европе и в Средиземноморье. *ESWD* – самая полная база данных по таким событиям в Европе.

Национальный центр экологической информации Национального управления океанических и атмосферных исследований США (*NOAA National Centers for Environmental Information*, *NCEI NOAA*) отвечает за мониторинг окружающей среды, сохранение и оценку национальных геофизических данных и информации, обеспечение публичного доступа к ним. Одна из задач центра – хранение и ассимиляция данных о цунами, землетрясениях и вулканах для поддержки их исследований, планирования действий при угрозах возникновения опасностей, быстрого реагирования на них и смягчения последствий.

Миссия Геологической службы США (*United States Geological Survey*, сокр. *USGS*) в отношении ОПЯ состоит в том, чтобы развивать науку об опасностях окружающего мира и применять ее для обеспечения безопасности

---

<sup>23</sup> URL: [www.munichre.com](http://www.munichre.com) (date of access: 12.05.2022).

и экономического благосостояния США. Научные исследования *USGS* помогают снизить риски стихийных бедствий и информировать о возможных будущих катастрофах, получить достоверные сведения о характеристиках опасных событий – их частоте, величине, степени, начале, последствиях и т. д.

В Италии с 1990 г. ведется база данных исторической информации об оползнях и наводнениях в стране – проект *AVI* Национального исследовательского совета, в которой представлены регулярные сведения с 1917 по 2000 г., нерегулярные для периодов с 1900 по 1916 г. и с 2001 по 2002 г. В эту базу включена информация о более чем 32 000 оползней, произошедших на более чем 21 000 участках, и о более чем 29 000 наводнений, произошедших более чем на 14 000 участках. Независимо от проекта *AVI* в Италии также разработана Информационная система по гидрологическим и геоморфологическим катастрофам *SICI* (*Sistema Informativo sulle Catastrofi Idrogeologiche*), которая в настоящее время является крупнейшим единым хранилищем исторической информации об оползнях и наводнениях в Италии.

### **Дистанционные наблюдения**

Использование спутниковых данных адаптировано для мониторинга стихийных бедствий и получения важной информации до, во время и после событий. В настоящее время привлечение результатов спутникового мониторинга при борьбе с последствиями возникновения ОПЯ является обычной практикой [44, 45]. Это единственное средство, которое может предоставить крупномасштабные пространственно-распределенные наборы географически привязанных данных.

Н. Керле и К. Оппенгеймер [46] исследовали эффективность использования оптических и радиолокационных датчиков в качестве инструментов управления бедствиями в Лахаре. С. Войт в своем исследовании [44] применил эффективные методы анализа изображений на основе спутниковых данных из нескольких источников для оперативного создания карт при управлении стихийными бедствиями и кризисами. В исследовании также использовались спутниковые данные для быстрой оценки последствий от стихийных бедствий, произошедших в разных уголках Земли.

Работа, проделанная Д. Тралли [47], продемонстрировала, как данные спутникового мониторинга могут быть эффективно использованы в сочетании с математическим моделированием для прогнозирования и визуализации результатов, эффективного принятия решений в случае возникновения землетрясений, наводнений, оползней, извержений вулканов. В работе [48] показана эффективность борьбы со стихийными бедствиями в случае, когда результаты дистанционного зондирования сочетаются с другими технологиями, такими как ГИС и Глобальная навигационная спутниковая система (*GNSS*).

Л. Монтойя [49] разработал рентабельный и быстрый метод сбора данных для инвентаризации на основе дистанционного зондирования, глобальной системы позиционирования (*GPS*), цифрового видео (*DV*) и ГИС для управления городскими рисками. В работах [11, 48] показаны эффективные методы мониторинга и предотвращения последствий землетрясений, извержений вулканов, наводнений, оползней и прибрежных опасностей на основе сочетания результатов дистанционного зондирования Земли, ГИС и *GNSS*.

Мониторинг стихийных бедствий, обеспечиваемый визуализацией данных, собранных из различных источников, предоставляет общественности важную информацию о распространении стихийных бедствий и помогает подготовиться к их последствиям. Веб-служба визуализации, созданная Австралией на основе спутника *Sentinel*<sup>24</sup>, предоставляет в открытом доступе графическую информацию о лесных пожарах, происходящих по всей Австралии.

Система мониторинга, разработанная К. Цзоу [50], способствует быстрому извлечению информации из спутниковых данных дистанционного зондирования Земли для подготовки к возможным сценариям бедствий. К. Бом с соавторами [51] предложили геовизуальные аналитические решения в секторе общественного здравоохранения для улучшения планирования подготовки и реагирования на чрезвычайные ситуации. *Climate Engine*, разработанный Д. Хантингтоном с коллегами [52], помогает визуализировать климатические данные в интерактивном графическом интерфейсе пользователя для подготовки к любым стихийным бедствиям. Д. Тралли с соавторами [47] сосредоточили внимание на использовании спутниковых данных дистанционного зондирования Земли при построении геопространственных моделей для мониторинга стихийных бедствий с целью эффективной подготовки к ним.

### Заключение

С увеличением повторяемости ОПЯ с начала XXI в. и развитием информационных технологий, таких как создание электронных баз данных, ГИС, использование спутниковой информации и математического моделирования, появилась возможность анализировать, прогнозировать, оценивать и минимизировать (хоть и в неполной мере) последствия проявлений этих явлений.

Решение проблем прогнозирования, мониторинга и минимизации последствий возникновения ОПЯ и их сочетаний требует междисциплинарного подхода и особенно взаимодействия между всеми заинтересованными сторонами – обществом, властью, наукой, бизнесом. Важно разрабатывать и внедрять планы по интегрированному управлению в регионах, особенно подверженных рискам. Это требуется для устойчивого управления природно-техногенными системами, особенно в приморских районах, и касается устранения всего спектра опасностей, включая загрязнение окружающей среды, для защиты естественных сред обитания флоры и фауны, инфраструктуры, жилых районов и туристических дестинаций.

Важно развивать международную сеть наблюдений за природными явлениями и процессами по всему миру, включая территории с экстремальными условиями (Крайний Север, высокогорные области, пустыни). Это позволит отслеживать зарождение, развитие и эволюцию процессов, их трансформацию и распространение.

Большая проблема, по нашему мнению, заключается в том, что в России и в мире в целом существует большое несоответствие между выводами фундаментальных исследований и решениями, принимаемыми властными органами. Результаты фундаментальных работ становятся известны только узким специалистам, не доводятся до сведения соответствующих органов и служб и, соответственно, не применяются на практике.

---

<sup>24</sup> URL: <https://www.ga.gov.au/> (date of access: 02.05.2022).



**Термины и определения в области опасных и мультиопасных явлений  
по данным различных источников**

Бедствие / экстремальное метеорологическое или климатическое явление / опасное явление:

– стихийное бедствие или антропогенное событие, повлекшее за собой широкомасштабные человеческие, экологические, экономические или материальные убытки. Неблагоприятные последствия стихийного бедствия могут превышать способность пострадавшего сообщества или общества справиться с ситуацией, используя собственные ресурсы (*Krausmann E., Cruz A., Salzano E. Natech risk assessment and management: reducing the risk of natural-hazard impact on hazardous installations. Elsevier, 2016. P. 241–243*);

– явление, которое редко наблюдается в конкретном месте и в конкретное время года. Метеорологическое явление обычно считается экстремальным, если наблюдается столь же редко или еще реже, чем 10-й или 90-й процентиль функции распределения вероятностей, оцениваемой по данным наблюдений (*Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation : special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, 2012. 582 p. ; Терминологический глоссарий UNISDR. Женева, Швейцария, 2009. 43 с.*);

– возникновение природного или антропогенного явления в определенном месте в течение определенного периода времени из-за наличия опасности (URL: <https://www.undrr.org/terminology>);

– гидрометеорологическое, геофизическое или обусловленное деятельностью человека событие, которое создает опасность какого-либо уровня для жизни, собственности или окружающей среды. Это обязательно суровые и экстремальные метеорологические и климатические явления (URL: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=7904](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7904)).

Мультиопасности:

– несколько основных опасных явлений, которые наблюдаются в конкретной стране / опасные явления, которые могут происходить одновременно, каскадно или кумулятивно через промежуток времени и учитывая возможные взаимосвязанные эффекты (*Krausmann E., Cruz A., Salzano E. Natech risk assessment ... P. 241–243*);

– различные опасные события, угрожающие одним и тем же объектам (совпадение во времени) / опасные события, происходящие одновременно или вскоре следующие друг за другом (каскадные эффекты). Относится к совокупности соответствующих опасностей в определенной административной зоне (*Managing the risks ... 582 p. ; Терминологический глоссарий UNISDR ... 43 с.*);

– несколько основных опасных явлений, которые наблюдаются в конкретной стране / опасные явления, которые могут происходить одновременно, каскадно или кумулятивно через промежуток времени и учитывая возможные взаимосвязанные эффекты (URL: <https://www.undrr.org/terminology>).

### Опасность:

– источник опасности. Опасность не обязательно ведет к причинению вреда, но предоставляет только возможность причинения вреда (*Krausmann E., Cruz A., Salzano E. Natech risk assessment ...* P. 241–243);

– физический феномен, связанный с климатическими изменениями (например, подъем уровня моря, штормовой нагон), который может нанести ущерб и убытки собственности, инфраструктуре, источникам средств к существованию, предоставлению услуг и экологическим ресурсам (*Managing the risks ...* 582 p. ; Терминологический глоссарий UNISDR ... 43 с.);

– потенциально опасное физическое событие, явление или человеческая деятельность, которые могут привести к гибели людей или травмам, имущественному ущербу, социальным и экономическим нарушениям или ухудшению состояния окружающей среды (URL: <https://www.undrr.org/terminology>).

### Риск:

– сочетание частоты или вероятности возникновения и последствий опасного события. Таким образом, риск включает в себя вероятность преобразования опасности в фактическое нанесение телесных повреждений, ущерба или вреда. Риск всегда связан с неопределенностью, связанной с наступлением события (*Krausmann E., Cruz A., Salzano E. Natech risk assessment ...* P. 241–243);

– количественно оценивает и классифицирует потенциальные последствия опасных событий на исследуемых территориях и объектах воздействия (т. е. элементы, потенциально подверженные риску), сочетая опасность, подверженность и уязвимость. Он может быть выражен в вероятностном или относительном/полуколичественном выражении (*Managing the risks ...* 582 p. ; Терминологический глоссарий UNISDR ... 43 с.).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондур В. Г., Крапивин В. Ф., Савиных В. П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М. : Научный мир, 2009. 690 с.
2. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review / D. R. Easterling [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2000. Vol. 81, iss. 3. P. 417–426. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2)
3. *Bongaarts J.* Human population growth and the demographic transition // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. Vol. 364, iss. 1532. P. 2985–2990. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0137>
4. *Middleton N. J., Sternberg T.* Climate hazards in drylands: A review // *Earth-Science Reviews*. 2013. Vol. 126. P. 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.07.008>
5. Natural disaster hotspots: A global risk analysis / M. Dillel [et al.]. Washington, DC : World Bank, 2005. 132 p. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7376> (date of access: 19.04.2022).
6. A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment / V. Gallina [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2016. Vol. 168. P. 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011>
7. *Bell R., Glade T.* Multi-hazard analysis in natural risk assessments // *Risk Analysis IV* / Edited by C. A. Brebbia. WIT Press, 2004. (WIT Transactions on Ecology and the Environment ; vol. 77). doi:10.2495/RISK040181. URL: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/77/14298> (date of access: 19.04.2022).

8. *Glade T., van Elverfeldt K.* MultiRISK: An innovative concept to model natural risks // *Landslide risk management : Proceedings of the international conference on landslide risk management, Vancouver, Canada, 31 May-3 June 2005.* Leiden, Netherlands : A.A. Balkema, 2005. P. 551–555. <https://doi.org/10.1201/9781439833711>
9. *Understanding risk in an evolving world: Emerging best practices in natural disaster risk assessment / A. L. Simpson [et al.].* Washington, DC : World Bank, 2014. 224 p. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/20682> (date of access: 19.04.2022).
10. *Curt C.* Multirisk: What trends in recent works? – A bibliometric analysis // *Science of The Total Environment.* 2021. Vol. 763. 142951. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142951>
11. *Multi-hazard and multi-risk decision-support tools as a part of participatory risk governance: Feedback from civil protection stakeholders / N. Komendantova [et al.] // International Journal of Disaster Risk Reduction.* 2014. Vol. 8. P. 50–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2013.12.006>
12. *Terminology of natural hazards and disasters: A review and the case of Brazil / B. E. Monte [et al.] // International Journal of Disaster Risk Reduction.* 2021. Vol. 52. 101970. doi:10.1016/j.ijdr.2020.101970
13. *Liu B., Siu Y. L., Mitchell G.* Hazard interaction analysis for multi-hazard risk assessment: a systematic classification based on hazard-forming environment // *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 2016. Vol. 16, iss. 2. P. 629–642. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-629-2016>
14. *Elliott M., Trono A., Cutts N. D.* Coastal hazards and risk // *Coastal zone management / Ed. D. R. Green.* Thomas Telford Publishing, 2010. Chapter 17. P. 396–432. <https://doi.org/10.1680/czm.35164.0017>
15. *Jones D.* Environmental hazards: The challenge of change: Environmental hazards in the 1990s: problems, paradigms and prospects // *Geography.* 1993. Vol. 78, no. 2. P. 161–165. URL: <https://www.jstor.org/stable/40572498> (date of access: 01.05.2022).
16. *Mitchell J. T., Cutter S. L.* Global Change and Environmental Hazards: Is the World Becoming More Disastrous? Washington, D. C. : Association of American Geographers, 1997. 216 p.
17. *Below R., Wirtz A., Guha-Sapir D.* Disaster category classification and peril terminology for operational purposes : working paper. Brussels : Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2009. 20 p. URL: [https://cred.be/downloadFile.php?file=sites/default/files/Dis-CatClass\\_264.pdf](https://cred.be/downloadFile.php?file=sites/default/files/Dis-CatClass_264.pdf) (date of access: 01.05.2022).
18. *Gill J. C., Malamud B. D.* Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards // *Reviews of Geophysics.* 2014. Vol. 52, iss. 4. P. 680–722. <https://doi.org/10.1002/2013RG000445>
19. *White G. F., Kates R. W., Burton I.* Knowing better and losing even more: the use of knowledge in hazards management // *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards.* 2001. Vol. 3, iss. 3–4. P. 81–92. [https://doi.org/10.1016/S1464-2867\(01\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S1464-2867(01)00021-3)
20. *Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy / W. Marzocchi [et al.] // Natural Hazards.* 2012. Vol. 62, iss. 2. P. 551–573. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0092-x>
21. *Wipulanusat W., Nakrod S., Prabnarong P.* Multi-hazard risk assessment using GIS and RS applications: a case study of Pak Phanang Basin // *Walailak Journal of Science and Technology.* 2009. Vol. 6, iss. 1. P. 109–125. URL: <https://wjst.wu.ac.th/index.php/wjst/article/view/76> (date of access: 01.05.2022).
22. *Loat R.* Risk management of natural hazards in Switzerland. Bern, 2010. 15 p. URL: [https://www.sistemaprotezionecivile.it/allegati/1149\\_Svizzera\\_Risk\\_Management.pdf](https://www.sistemaprotezionecivile.it/allegati/1149_Svizzera_Risk_Management.pdf) (date of access: 01.05.2022).
23. *Chiesa C., Laben C., Cicone R.* An Asia Pacific natural hazards and vulnerabilities atlas // *30th International Symposium on Remote Sensing of Environment, November 10-14, 2003, Honolulu, Hawaii : proceedings.* International Center for Remote Sensing of Environment, 2003.
24. *GIS-based landslide susceptibility mapping using hybrid MCDM models / A. S. Jam [et al.] // Natural Hazards.* 2021. Vol. 108, iss. 1. P. 1025–1046. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04718-5>

25. Development of a drought vulnerability index using MCDM and GIS: study case in São Paulo and Ceará, Brazil / G. de Azevedo Reis [et al.] // *Natural Hazards*. 2020. Vol. 104, iss. 2. P. 1781–1799. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04247-7>
26. GIS-based MCDM – AHP modeling for flood susceptibility mapping of arid areas, southeastern Tunisia / D. Souissi [et al.] // *Geocarto International*. 2020. Vol. 35, iss. 9. P. 991–1017. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1566405>
27. New MCDM methods under uncertainty applied to integrated natural risks management / J. M. Tacnet [et al.] // 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA). IEEE, 2017. P. 193–198. <https://doi.org/10.1109/CIVEMSA.2017.7995325>
28. Методы многокритериального анализа решений / М. О. Петросян [и др.] // Решетневские чтения : материалы XX Юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09-12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. Красноярск : Сибирский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. М. Ф. Решетнева, 2016. Ч. 2. С. 76–77. URL: <https://disk.sibsau.ru/index.php/s/UGP7UcMvdmYV7o> (дата обращения: 01.05.2022).
29. Identification of natural hazards and classification of urban areas by TOPSIS model (case study: Bandar Abbas city, Iran) / R. M. Najafabadi [et al.] // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2016. Vol. 7, iss. 1. P. 85–100. <https://doi.org/10.1080/19475705.2013.871353>
30. Nyimbili P. H., Erden T., Karaman H. Integration of GIS, AHP and TOPSIS for earthquake hazard analysis // *Natural Hazards*. 2018. Vol. 92, iss. 3. P. 1523–1546. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3262-7>
31. Lee G., Jun K.-S., Chung E.-S. Integrated multi-criteria flood vulnerability approach using fuzzy TOPSIS and Delphi technique // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. Vol. 13, iss. 5. P. 1293–1312. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1293-2013>
32. Lozoya J. P., Sarda R., Jiménez J. A. A methodological framework for multi-hazard risk assessment in beaches // *Environmental Science & Policy*. 2011. Vol. 14, iss. 6. P. 685–696. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.05.002>
33. Safaripour M., Rezapour Andabili N. Miyandoab flood risk mapping using dematel and SAW methods and DPSIR model // *Advances in Environmental Technology*. 2020. Vol. 6, iss. 3. P. 131–138. <https://doi.org/10.22104/AET.2021.4766.1287>
34. Appelquist L. R., Halsnaes K. The Coastal Hazard Wheel system for coastal multi-hazard assessment & management in a changing climate // *Journal of Coastal Conservation*. 2015. Vol. 19, iss. 2. P. 157–179. <https://doi.org/10.1007/s11852-015-0379-7>
35. Micallef S., Micallef A., Galdies C. Application of the Coastal Hazard Wheel to assess erosion on the Maltese coast // *Ocean & Coastal Management*. 2018. Vol. 156. P. 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.06.005>
36. Regional coastal erosion assessment based on global open access data: a case study for Colombia / J. Stronkhorst [et al.] // *Journal of Coastal Conservation*. 2018. Vol. 22, iss. 4. P. 787–798. <https://doi.org/10.1007/s11852-018-0609-x>
37. Evaluation of human thermal comfort using UTCI index: case study Khorasan Razavi, Iran / M. Baaghdeh [et al.] // *Natural Environment Change*. 2016. Vol. 2, no. 2. P. 165–175. URL: [https://jnec.ut.ac.ir/article\\_61007\\_263c37873764f267f74ad7af06cabf05.pdf](https://jnec.ut.ac.ir/article_61007_263c37873764f267f74ad7af06cabf05.pdf) (date of access: 30.05.2022).
38. Esmaili R., Montazeri M. The determine of the Mashad bioclimatic condition base on hourly data // *Geography and Environmental Planning*. 2013. Vol. 24, no. 1. P. 215–230. URL: [https://gep.ui.ac.ir/article\\_18590.html?lang=en](https://gep.ui.ac.ir/article_18590.html?lang=en) (date of access: 25.05.2022).
39. Yaglou C. P., Minard D. Control of heat casualties at military training centers // *A.M.A. Archives of Industrial Health*. 1957. Vol. 16, no. 4. P. 302–316. URL: [https://archive.org/details/sim\\_a-m-a-archives-of-industrial-health\\_1957-10\\_16\\_4/page/316/mode/2up](https://archive.org/details/sim_a-m-a-archives-of-industrial-health_1957-10_16_4/page/316/mode/2up) (date of access: 25.05.2022).

40. Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index / P. Peduzzi [et al.] // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2009. Vol. 9, iss. 4. P. 1149–1159. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1149-2009>
41. Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness / F. H. Norris [et al.] // *American Journal of Community Psychology*. 2008. Vol. 41, iss. 1–2. P. 127–150. <https://doi.org/10.1007/s10464-007-9156-6>
42. *Greiving S., Fleischhauer M., Lückenköter J.* A methodology for an integrated risk assessment of spatially relevant hazards // *Journal of Environmental Planning and Management*. 2006. Vol. 49, iss. 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1080/09640560500372800>
43. Flood timescales: Understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology / L. Gaál [et al.] // *Water Resources Research*. 2012. Vol. 48, iss. 4. W04511. doi:10.1029/2011WR011509
44. Satellite image analysis for disaster and crisis-management support / S. Voigt [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007. Vol. 45, no. 6. P. 1520–1528. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.895830>
45. Mapping and monitoring geological hazards using optical, LiDAR, and synthetic aperture RADAR image data / K. E. Joyce [et al.] // *Natural Hazards*. 2014. Vol. 73, iss. 2. P. 137–163. doi:10.1007/s11069-014-1122-7
46. *Kerle N., Oppenheimer C.* Satellite remote sensing as a tool in lahar disaster management // *Disasters*. 2002. Vol. 26, iss. 2. P. 140–160. <https://doi.org/10.1111/1467-7717.00197>
47. Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards / D. M. Tralli [et al.] // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2005. Vol. 59, iss. 4. P. 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.02.002>
48. An analysis of geospatial technologies for risk and natural disaster management / L. A. Manfré [et al.] // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2012. Vol. 1, iss. 2. P. 166–185. doi:10.3390/ijgi1020166
49. *Montoya L.* Geo-data acquisition through mobile GIS and digital video: an urban disaster management perspective // *Environmental Modelling & Software*. 2003. Vol. 18, iss. 10. P. 869–876. doi:10.1016/S1364-8152(03)00105-1
50. *Zou Q.* Research on cloud computing for disaster monitoring using massive remote sensing data // 2017 IEEE 2nd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA). IEEE, 2017. P. 29–33. doi:10.1109/ICCCBDA.2017.7951879
51. *Böhm K., Mehler-Bicher A., Fenchel D.* GeoVisualAnalytics in the public health sector // *Proceedings 2011 IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services*. IEEE, 2011. P. 291–294. doi:10.1109/ICSDM.2011.5969049
52. Climate engine: Cloud computing and visualization of climate and remote sensing data for advanced natural resource monitoring and process understanding / J. L. Huntington [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2017. Vol. 98, iss. 11. P. 2397–2410. doi:10.1175/BAMS-D-15-00324.1

*Сведения об авторах:*

**Янцкая Наталья Александровна**, заместитель директора по науке, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук» (354002, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 2/28); ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4931-484X**, **ResearcherID: I-3169-2013**, **Scopus Author ID: 55349362100**, **SPIN-код: 1339-1317** **AuthorID: 637712**, [yaitskayan@gmail.com](mailto:yaitskayan@gmail.com)


**Магаева Анастасия Алексеевна**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), **ORCID ID: 0000-0002-3519-3565**, **ResearcherID: AAG-1117-2021**, **Scopus Author ID: 14629086400**, **SPIN-код: 6735-9326** **AuthorID: 847661**, [a.mageva@mail.ru](mailto:a.mageva@mail.ru)

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА


УДК 551.465.62(262.5)

DOI: 10.22449/0233-7584-2022-3-276-290

## Процессы, определяющие синхронную междесятилетнюю изменчивость поверхностной температуры Баренцева и Черного морей

А. А. Сизов , Т. М. Баянкина, В. Л. Посошков, А. Е. Анисимов

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

 *sizov\_anatoliy@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.02.2022; одобрена после рецензирования 24.02.2022;  
принята к публикации 15.03.2022.

### *Аннотация*

*Цель.* Рассмотрено фазовое соответствие междесятилетней изменчивости индексов Североатлантического колебания и Атлантической мультидекадной осцилляции и их влияние на механизм синхронного формирования аномалии поверхностной температуры в Баренцевом и Черном морях.

*Методы и результаты.* Значения аномалии поверхностной температуры Баренцева и Черного морей выбирались из массивов данных о морском льде и температуре морской поверхности Центра прогнозирования и исследования климата им. Хэдли (Hadley Centre for Climate Prediction and Research). Для оценки циркуляции атмосферы в Атлантико-Европейском секторе использовались индексы Североатлантического колебания, Атлантической мультидекадной осцилляции и положение высотной фронтальной зоны. Анализ корреляции между положением высотной фронтальной зоны и значениями индекса Североатлантического колебания проводился по сглаженным фильтром скользящего среднего исходным рядам, а пространственное распределение аномалий поверхностной температуры анализировалось по композитным картам. При отрицательных значениях Атлантической мультидекадной осцилляции (1950–1970 гг.) преобладали процессы, характерные для отрицательных значений индекса Североатлантического колебания, а при положительных значениях индекса Атлантической мультидекадной осцилляции (1970–1990 гг.) преобладали процессы, характерные для положительных значений индекса Североатлантического колебания.

*Выводы.* Циркуляция атмосферы в Атлантико-Европейском секторе является основным механизмом, регулирующим аномалию поверхностной температуры Северной Атлантики и аномалию поверхностной температуры Баренцева и Черного морей. При положительных значениях индекса Североатлантического колебания температура поверхности Баренцева моря становилась выше, а Черного моря – ниже климатической нормы. При отрицательных значениях индекса Североатлантического колебания температура поверхности Баренцева моря становилась ниже, а Черного моря – выше климатической нормы.

**Ключевые слова:** Баренцево море, Черное море, аномалия поверхностной температуры, температура поверхности океана, Атлантическая мультидекадная осцилляция, Североатлантическое колебание

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0555-2021-0002 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата».


**Для цитирования:** Процессы, определяющие синхронную междесятилетнюю изменчивость поверхностной температуры Баренцева и Черного морей / А. А. Сизов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 276–290. doi:10.22449/0233-7584-2022-3-276-290

© Сизов А. А., Баянкина Т. М., Посошков В. Л., Анисимов А. Е., 2022

# Processes Determining Synchronous Interdecadal Variability of Surface Temperature in the Barents and Black Seas

A. Sizov , T. M. Bayankina, V. L. Pososhkov, A. E. Anisimov

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

 *sizov\_anatoliy@mail.ru*

## *Abstract*

*Purpose.* The work is devoted to considering the phase correspondence between the interdecadal variability of the North Atlantic Oscillation and the Atlantic Multidecadal Oscillation indices, and their influence on the mechanism of synchronous formation of the surface temperature anomalies in the Barents and Black seas.

*Methods and Results.* The surface temperature anomaly values in the Barents and Black seas selected from the Hadley Centre for Climate Prediction and Research arrays, namely from the sea ice and sea surface temperature data set, were used. To assess the atmospheric circulation in the Atlantic-European sector, the North Atlantic Oscillation and Atlantic Multidecadal Oscillation indices, as well as the position of the tropospheric frontal zone were applied. The correlation between the position of the tropospheric frontal zone and the values of the North Atlantic Oscillation index was analyzed using the initial series smoothed by a filter of a moving average, and spatial distribution of the surface temperature anomalies – by the composite maps. At the negative values of the Atlantic Multidecadal Oscillation (1950–1970), the processes characteristic of the negative values of the North Atlantic Oscillation index were predominant, whereas at the positive values of the Atlantic Multidecadal Oscillation index (1970–1990), the processes characteristic of the positive values of the North Atlantic Oscillation index prevailed.

*Conclusions.* The atmospheric circulation in the Atlantic-European sector constitutes the basic mechanism regulating the sea surface temperature anomalies in the North Atlantic, as well as in the Barents and Black seas. At the positive values of the North Atlantic Oscillation index, the sea surface temperature in the Barents Sea became higher, and that of the Black Sea – lower than the climate mean. At the negative values of the North Atlantic Oscillation index, the sea surface temperature in the Barents Sea became lower, and that of the Black Sea – higher relative to the climate mean.

**Keywords:** Barents Sea, Black Sea, surface temperature anomaly, Atlantic Multidecadal Oscillation, North Atlantic Oscillation

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the state assignment of FRC MHI on theme No. 0555-2021-0002 “Fundamental research on the interaction processes in the ocean-atmosphere system determining regional spatial and temporal variability of the natural environment and climate”.

**For citation:** Sizov, A.A., Bayankina, T.M., Pososhkov, V.L. and Anisimov, A.E., 2022. Processes Determining Synchronous Interdecadal Variability of Surface Temperature in the Barents and Black Seas. *Physical Oceanography*, 29(3), pp. 257-270. doi:10.22449/1573-160X-2022-3-257-270

## Введение

Поверхностная температура Баренцева и Черного морей зимой изменяется под воздействием циркуляции атмосферы в Атлантико-Европейском секторе и притока атлантических вод в западный сектор Северного Ледовитого океана. Циркуляция атмосферы, определяемая индексом Североатлантического колебания (САК) [1–3], регулирует поступление теплого атлантического воздуха в средние и высокие широты Атлантико-Европейского сектора. Это регулирование осуществляется через циклоническую активность, которая проявляется в смещении траектории циклонов в разные фазы САК. В положительную фазу САК циклоны смещаются к северу, в отрицательную фазу – к югу [1, 2].

Кроме того, на изменчивость температуры Баренцева моря оказывает влияние приток атлантических вод [4–6]. При этом на межгодовом и десятилетнем масштабах поступление этих вод в североευропейские моря, включая Баренцево, также регулируется циркуляцией атмосферы (индекс САК) [7–9]. По оценке авторов работ [8, 9], максимальное поступление атлантических вод в североευропейские моря отмечается в отрицательную фазу САК.

Тепловое состояние Северной Атлантики, представленное Атлантической мультидекадной осцилляцией (АМО), изменяется в широком диапазоне масштабов [4, 10, 11]. По некоторым оценкам [12, 13], мультидекадная мода САК соответствует АМО таким образом, что положительной (отрицательной) фазе САК соответствует отрицательная (положительная) фаза АМО.

В отличие от Баренцева моря поверхностная температура Черного моря изменяется в основном под влиянием воздушных масс, переносимых в процессе атмосферной циркуляции, определяемой индексом САК. Таким образом, изменчивость зимней поверхностной температуры (аномалии поверхностной температуры (АПТ) Баренцева и Черного морей) обусловлена совместным влиянием циркуляции атмосферы (индекс САК) и десятилетней изменчивости поверхностной температуры Северной Атлантики (индекс АМО). В статье авторы более детально исследовали процессы, влияющие на изменчивость поверхностной температуры Баренцева и Черного морей, кратко описанные в ранее опубликованной работе [14].

Цель работы заключается в рассмотрении фазового соответствия десятилетней изменчивости индексов САК и АМО и их влияния на механизм синхронного формирования АПТ в Баренцевом и Черном морях.

### Данные и методы исследования

Значения аномалии поверхностной температуры Баренцева и Черного морей выбирались из массивов Центра прогнозирования и исследования климата им. Хэдли (*Hadley Centre for Climate Prediction and Research*) (URL: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/>). Значения индекса САК (средние за декабрь – март) выбирались из архива Центра прогнозирования климата (*Climate Prediction Center*) (URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml>). Индекс АМО представлен на сайте <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>. Широтное положение изогипсы 540 дкм (высотная фронтальная зона – ВФЗ) на меридианах 0° и 30° в. д. вычислялось по данным *NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST)* (URL: <https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>). Анализ корреляции между положением ВФЗ и значениями индекса САК проводился по сглаженным фильтром скользящего среднего исходным рядам, а пространственное распределение аномалий поверхностной температуры анализировалось по композитным картам. Акватории Баренцева и Черного морей ограничивались координатами 28°–43° в. д., 72°–77° с. ш. и 28°–42° в. д., 41°–47° с. ш. соответственно. Исследовались процессы, развивавшиеся в течение 1950–2020 гг.



## Результаты и обсуждение

Согласно нашим оценкам, междесятилетняя изменчивость индексов АМО и САК на временном интервале 1948–2020 гг. наблюдалась со сдвигом фазы (рис. 1). На рис. 1 представлены средние за декабрь – март значения индекса САК и средние за январь – март значения индекса АМО.

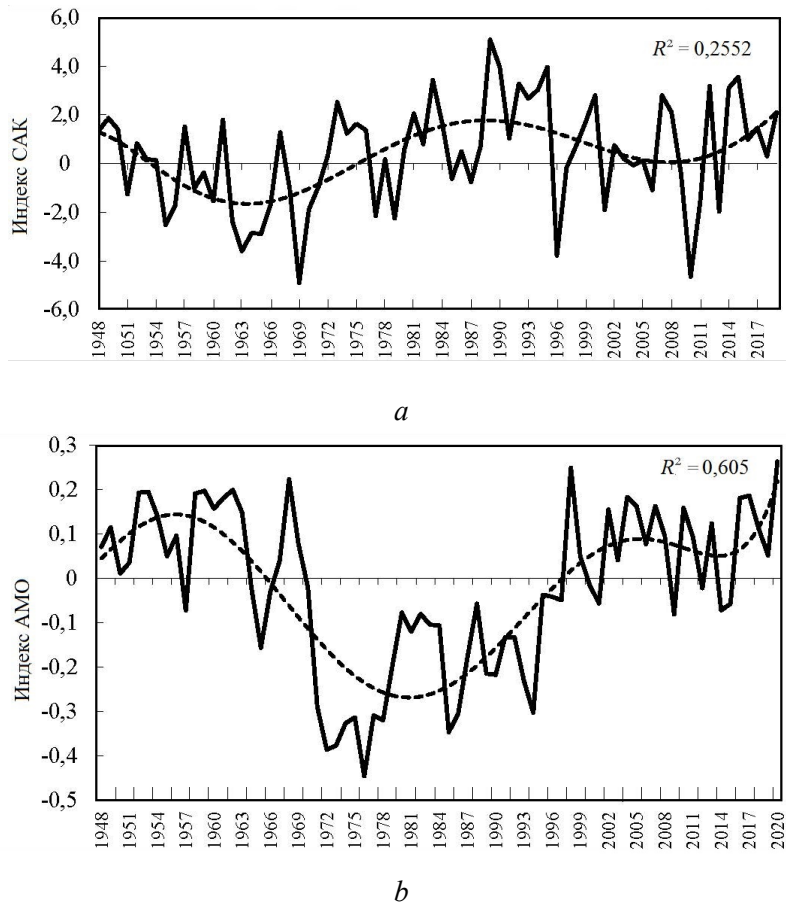


Рис. 1. Межгодовая изменчивость индексов САК (а) и АМО (b)  
Fig. 1. Interannual variability of the NAO (a) and AMO (b) indices

При полиномиальном сглаживании кривых на рис. 1 видно, что максимальные значения индекса САК наблюдаются на 8–10 лет раньше максимальных значений индекса АМО. Таким образом, отрицательные значения индекса САК были характерны для середины 1960-х гг., а отрицательные значения индекса АМО – для середины 1970-х гг. Положительные значения индекса САК были характерны для начала 1990-х гг., а положительные значения индекса АМО – для начала 2000-х гг.

Как следует из работы [3], при преобладании в течение нескольких лет процессов с экстремальными положительными или отрицательными значениями индекса САК изменяется циркуляция верхнего слоя Северной Атлантики. Следовательно, должна изменяться поверхностная температура океана,

что показано в многочисленных работах (смотри, например, [15–17]). Процесс формирования крупномасштабной АПТ Северной Атлантики в разные фазы САК требует отдельного исследования, но полученные нами оценки сдвига изменчивости индекса АМО относительно индекса САК подтверждают результаты работ [18, 19].

С учетом сдвига фаз межгодовой изменчивости индексов САК и АМО, влияющих на формирование АПТ Баренцева и Черного морей, были выбраны два временных отрезка. Первый временной отрезок (1957–1994 гг.) характеризовался преобладанием отрицательных значений индекса АМО и был условно определен как период «холодной» Северной Атлантики. Второй временной отрезок (1995–2020 гг.), который характеризовался положительными значениями индекса АМО, был условно назван периодом «теплой» Северной Атлантики. При отрицательных значениях индекса АМО (1950–1970 гг.) преобладали процессы, характерные для отрицательных значений индекса САК, а при положительных значениях индекса АМО (1970–1990 гг.) – для положительных значений индекса САК [3].

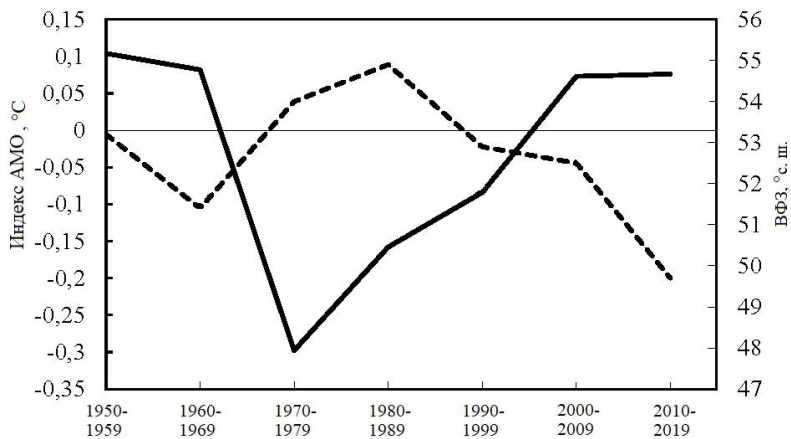
Атлантические воды непосредственно участвуют в формировании температуры верхнего слоя Баренцева моря [20]. Поэтому полученные нами оценки показывают, что значения междесятилетней изменчивости индекса АМО и АПТ Баренцева моря имеют значимую положительную корреляцию ( $R = 0,82$ ) на временном интервале 1950–2020 гг.

В то же время формирование АПТ Черного моря происходит, по-видимому, под слабым воздействием долговременного (климатического) изменения АМО. Поэтому междесятилетняя изменчивость АПТ Черного моря коррелирует с индексом АМО не значимо ( $R = 0,29$ ), но она значимо отрицательно коррелирована с индексом САК ( $R = -0,71$ ). Это свидетельствует о том, что междесятилетняя изменчивость АПТ Черного моря в значительной степени определяется циркуляцией атмосферы в Атлантико-Европейском секторе. Полученные оценки согласуются с выводами, полученными в работе [21], и дают основание полагать, что, по-видимому, траектории циклонов, переносящих воздушные массы в район Черного моря, определяются не только индексом САК, но и положением ВФЗ (рис. 2).

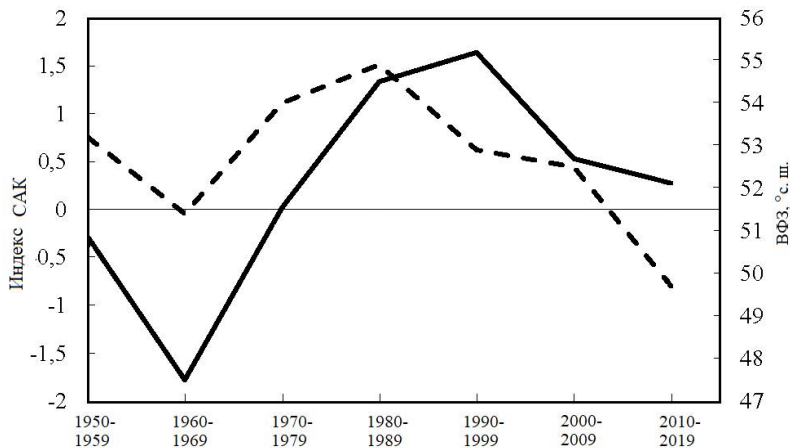
Известно, что барические системы в Атлантико-Европейском регионе переносятся в направлении ведущего потока в соответствии с положением изогипс в ВФЗ. Можно ожидать, что тепловое состояние Северной Атлантики оказывает влияние на состояние барического поля как приземного, так и на поверхности  $H_{500}$ . Поэтому рассмотрим междесятилетнюю изменчивость положения изогипсы 540 дкм (ВФЗ) в зависимости от АМО и САК.

На рис. 2 видно, что низкочастотная компонента ВФЗ над Восточной Европой изменяется в противофазе с индексом АМО ( $R = -0,70$ ) (рис. 2, *a*) и в фазе с индексом САК ( $R = 0,40$ ) (рис. 2, *b*). Это может означать, что междесятилетняя изменчивость траекторий циклонов в регионе Черного моря формируется под воздействием теплового состояния Северной Атлантики и циркуляции атмосферы, определяемой индексом САК. Низкочастотная изменчивость АПТ Северной Атлантики влияет на положение ВФЗ над восточной Европой таким образом, что в отрицательную фазу индекса АМО ВФЗ сдвигается на север, а в положительную – занимает более южное положение.

В положительную фазу индекса САК ВФЗ, наоборот, сдвигается на север, а в отрицательную – на юг. Существуют заметные особенности в изменении широтного положения ВФЗ над Восточной и Западной Европой в годы отрицательных и положительных значений индекса АМО. Эти особенности хорошо выделяются в рядах, сглаженных фильтром пятилетнего скользящего среднего. В таблице показаны коэффициенты корреляции между широтным положением ВФЗ в феврале и средними значениями индекса САК за декабрь – март.



*a*



*b*

**Р и с. 2.** Междесятилетия изменчивость широтного положения изогипсы 540 дкм (ВФЗ) в феврале на меридиане 30° в. д. (штриховая линия) и индексов АМО (сплошная линия) (*a*) и САК (сплошная линия) (*b*)

**Fig. 2.** Interdecadal variability of the latitudinal position of the 540 dcm isohypse (TFZ) in February at the meridian 30° E (dashed line), and the AMO (*a*) and NAO (*b*) indices (solid lines)

**Коэффициенты корреляции между широтным положением ВФЗ на 0° и 30° в. д. и индексом САК в различные фазы индекса АМО**  
**Correlation coefficients between the TFZ latitudinal position at 0° and 30° E, and the NAO index during different phases of the AMO index**

Параметры / Parameters	Широтное положение ВФЗ на 0° в. д. / Latitudinal position of TFZ at 0° E	Широтное положение ВФЗ на 30° в. д. / Latitudinal position of TFZ at 30° E	Индекс САК / NAO index
<i>Отрицательная фаза индекса АМО / Negative phase of the AMO index</i>			
Широтное положение ВФЗ на 0° в. д. / Latitudinal position of TFZ at 0° E		<b>0,49</b>	0,26
Широтное положение ВФЗ на 30° в. д. / Latitudinal position of TFZ at 30° E	<b>0,49</b>		<b>0,60</b>
Индекс САК / NAO index	0,26	<b>0,60</b>	
<i>Положительная фаза индекса АМО / Positive phase of the AMO index</i>			
Широтное положение ВФЗ на 0° в. д. / Latitudinal position of TFZ at 0° E		<b>-0,53</b>	<b>-0,57</b>
Широтное положение ВФЗ на 30° в. д. / Latitudinal position of TFZ at 30° E	<b>-0,53</b>		<b>0,49</b>
Индекс САК / NAO index	<b>-0,57</b>	<b>0,49</b>	

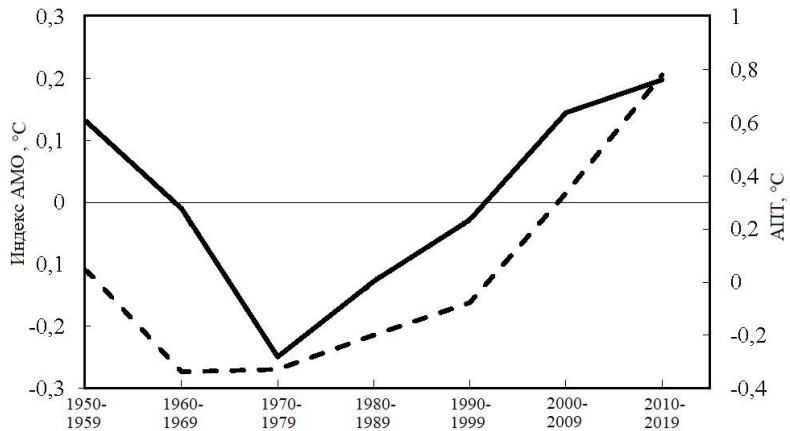
Пр и м е ч а н и е. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые на 95%-ном уровне доверительной вероятности.

Note. Bold type indicates the correlation coefficients significant at the 95 % confidence level.

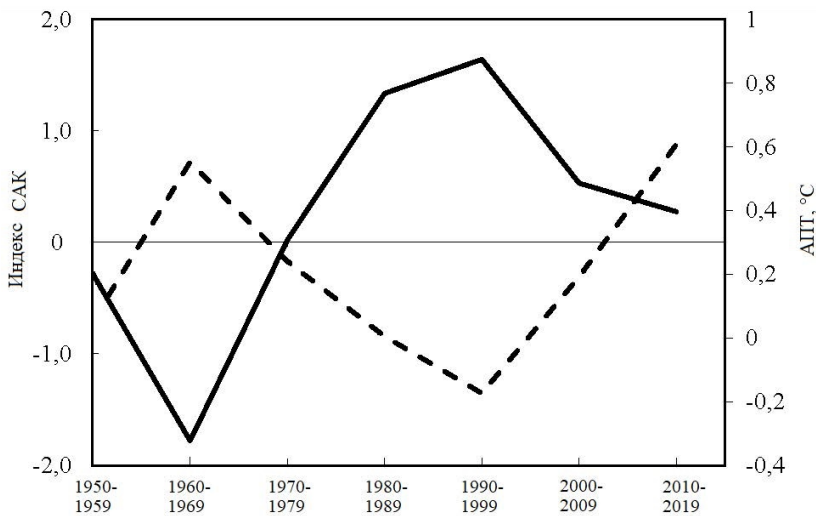
Из таблицы следует, что в годы отрицательных значений индекса АМО широтное положение ВФЗ как над Западной, так и над Восточной Европой изменяется синфазно. При этом ВФЗ на 0° и на 30° в. д. проявляет тенденцию к сдвигу на север в годы с максимальными значениями индекса САК и на юг в годы с его минимальными значениями. Особенно это заметно в ВФЗ с долгой 30° в. д. (коэффициент корреляции между широтным положением ВФЗ и индексом САК равен 0,60).

В годы положительных значений индекса АМО широтное положение ВФЗ над Западной и Восточной Европой изменяется в противофазе с индексом САК. В периоды с максимальными значениями индекса САК ВФЗ над Западной Европой сдвигается на юг ( $R = -0,57$ ), а над Восточной Европой – на север ( $R = 0,49$ ). Следовательно, траектории циклонов над Европой выстраиваются таким образом, что в годы отрицательных значений индекса АМО преобладает зональный перенос воздушных масс, и он происходит тем

севернее, чем выше значения индекса САК. В годы положительных значений индекса АМО процесс переноса воздушных масс усложняется, и в этом случае при высоких значениях индекса САК траектории циклонов над Западной Европой занимают более южное положение, а над Восточной Европой – более северное. При малых значениях индекса САК траектории циклонов над Западной Европой смещаются на север, а над Восточной Европой – на юг.



*a*



*b*

**Р и с. 3.** Междесятилетняя изменчивость индекса АМО (сплошная линия) и АПТ (штриховая линия) Баренцева моря (*a*), индекса САК (сплошная линия) и АПТ (штриховая линия) Черного моря (*b*)

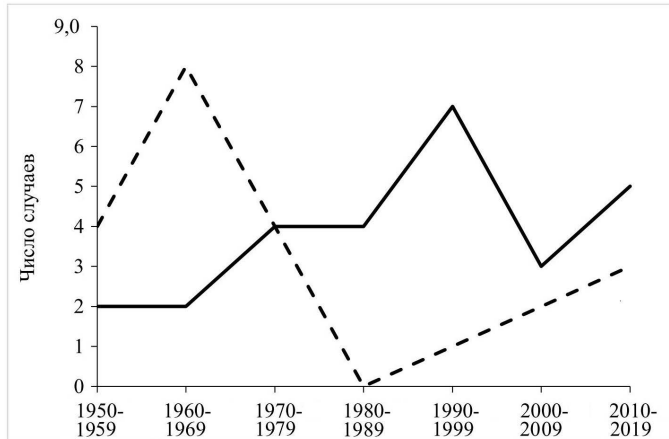
**Fig. 3.** Interdecadal variability of the AMO index (solid line) and SSTA (dashed line) of the Barents Sea (*a*), and the NAO index (solid line) and SSTA (dashed line) of the Black Sea (*b*)

Отмеченные особенности переноса атлантических вод и междесятилетней изменчивости зимней циркуляции атмосферы создают в регионах Баренцева и Черного морей характерные условия для формирования АПТ этих морей в годы отрицательных и положительных значений индекса АМО и САК (рис. 3).

На рис. 3 хорошо видно, что поступление атлантических вод в Арктический бассейн (индекс АМО) в значительной степени изменяет поверхностную температуру Баренцева моря ( $R = 0,82$ ). В то же время корреляция между междесятилетней изменчивостью АПТ Баренцева моря и индексом САК незначима. Это связано с тем, что междесятилетняя изменчивость АПТ Баренцева моря (рис. 3, *a*) наблюдалась в фазе с индексом САК в десятилетия отрицательных значений индекса АМО (1960–1999 гг.). В десятилетия положительных значений индекса АМО и минимальных значений индекса САК (2000–2019 гг.) поверхностная температура Баренцева моря стала быстро расти вследствие притока более теплой атлантической воды. Ослабление циклонической активности, которое наблюдается при минимальных значениях индекса САК [3, 20], не могло привести к значительному понижению поверхностной температуры, поэтому температура Баренцева моря в эти десятилетия повышалась (рис. 3, *a*).

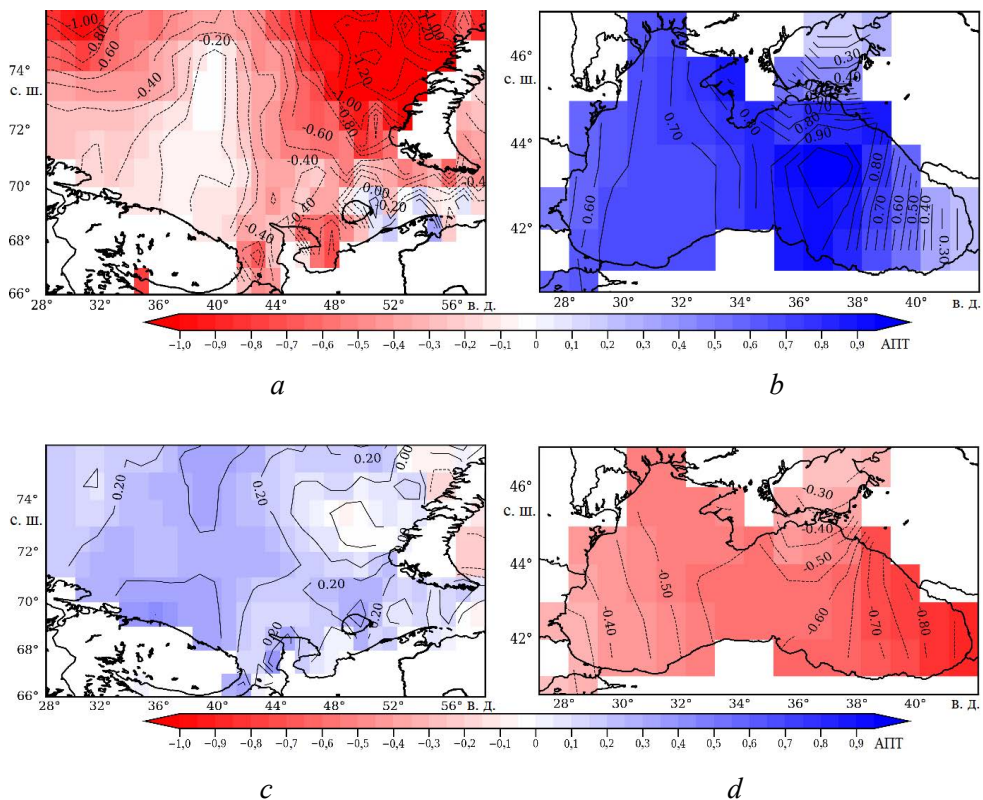
В Черном море циркуляция атмосферы, представленная индексом САК, в значительной степени формирует аномалии поверхностной температуры ( $R = -0,71$ ). Таким образом, в десятилетие отрицательных значений индекса САК (1961–1970 гг.) Черное море было теплее, чем в десятилетия положительных значений (1981–2000 гг.) (рис. 3, *b*). Из рис. 3 следует, что с 1951 по 2000 г. (годы условной «холодной» Северной Атлантики) междесятилетняя изменчивость АПТ Баренцева и Черного морей находилась в противофазе, а в годы «теплой» Северной Атлантики (2001–2020 гг.) – в фазе. Этот результат подчеркивает преимущественное влияние притока атлантических вод и относительно слабое влияние САК на междесятилетнюю изменчивость АПТ Баренцева моря в десятилетия «теплой» Северной Атлантики. Междесятилетняя изменчивость АПТ Черного моря, наоборот, формируется преимущественно под влиянием циркуляции атмосферы в Атлантико-Европейском секторе (индекс САК) и в меньшей степени под влиянием АПТ Северной Атлантики (индекс АМО) (рис. 4).

Композитные карты АПТ (рис. 5) для отрицательных значений индекса САК строились по десяти годам (1958, 1960, 1962, 1963, 1965, 1966, 1968, 1969, 1970, 1979), а для положительных значений – по семи годам (1957, 1976, 1983, 1990, 1991, 1992, 1993). В годы отрицательных значений индекса АМО при отрицательных значениях индекса САК вследствие ослабления циклонической активности [1–3, 20] средняя за январь – март температура поверхности Баренцева моря становилась ниже климатической нормы (рис. 5, *a*), а Черного моря – выше климатической нормы (рис. 5, *b*).



**Р и с. 4.** Число случаев аномальных значений индекса САК (сплошная линия – положительный индекс САК, штриховая линия – отрицательный индекс САК)

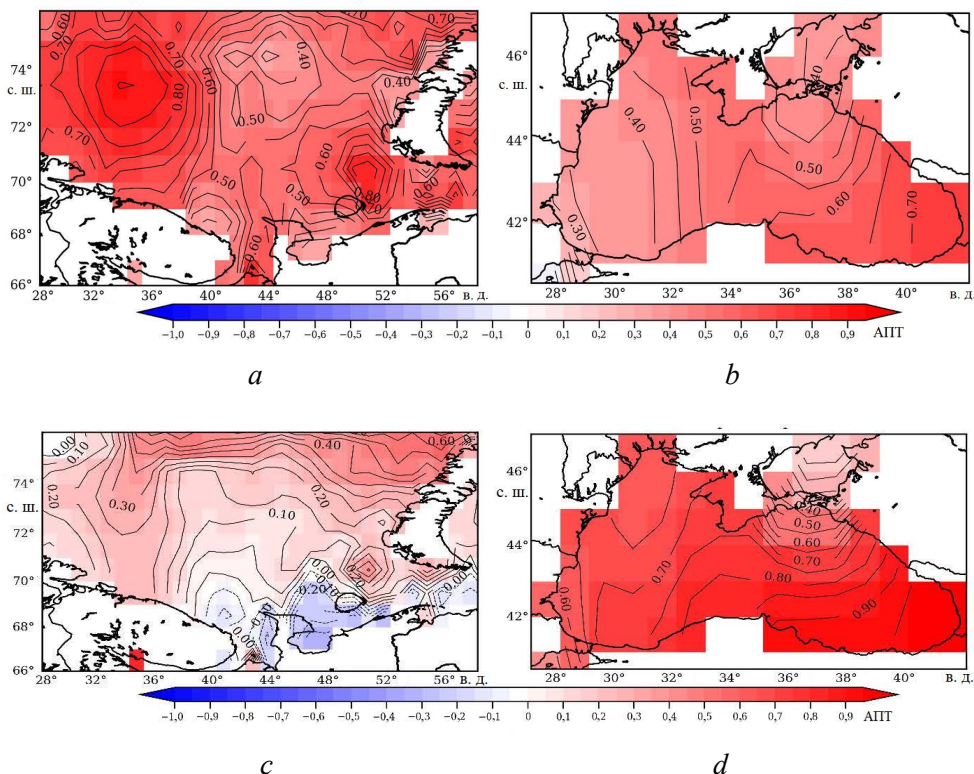
**F i g. 4.** Number of cases of abnormal values of the NAO index (solid line – positive NAO index, dashed line – negative NAO index)



**Р и с. 5.** Аномалии поверхностной температуры в годы отрицательных (*a, b*) и положительных (*c, d*) значениях индекса САК для Баренцева (*a, c*) и Черного (*b, d*) морей

**F i g. 5.** Surface temperature anomalies during the years of negative (*a, b*) and positive (*c, d*) NAO index values for the Barents (*a, c*) and Black (*b, d*) seas

В то же время при положительных значениях индекса САК вследствие интенсификации циклонической активности [1–3, 20] средняя за январь – март температура поверхности Баренцева моря становилась выше климатической нормы, а Черного моря – ниже (рис. 5, *b*). Это происходило в силу того, что при положительных значениях индекса САК ВФЗ на меридиане 30° в. д. сдвигалась к северу и, следовательно, траектории циклонов пролегли севернее Черного моря. А при отрицательных значениях индекса САК ВФЗ над восточной Европой занимала южное положение и, следовательно, Черное море оказывалось в области прохождения циклонов.



**Р и с. 6.** Аномалии поверхностной температуры в годы положительных значений индекса АМО при положительных (*a, b*) и отрицательных (*c, d*) значениях индекса САК для Баренцева (*a, c*) и Черного (*b, d*) морей

**F i g. 6.** Surface temperature anomalies during the years of positive values of the АМО index at the positive (*a, b*) and negative (*c, d*) NAO index values for the Barents (*a, c*) and Black (*b, d*) seas

Аналогичные условия формирования АПТ Баренцева и Черного морей наблюдались и в годы с положительной аномалией АМО (1995–2020 гг.). На рис. 6, *a, b* представлены композитные карты для положительных значений индекса САК, построенные по семи годам (2000, 2007, 2008, 2012, 2014, 2017, 2019), а на рис. 6, *c, d* – для отрицательных значений индекса САК по пяти годам (2001, 2006, 2010, 2011, 2013). Климатическая норма определялась за период 1981–2010 гг.

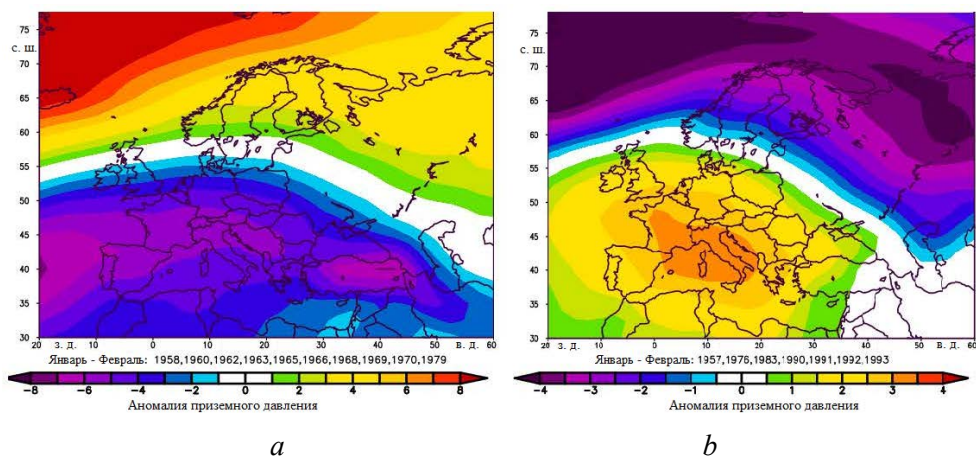
Построенные карты (рис. 6) позволили получить следующие оценки.



При положительных значениях индекса САК аномалия поверхностной температуры Баренцева моря повышена (0,53 °С), а Черного – понижена (0,59 °С) (рис. 6, *a, b*). При отрицательных значениях индекса САК (рис. 6, *c, d*) аномалия поверхностной температуры Баренцева моря понижена (0,10 °С), а Черного – повышена (0,98 °С).

### Обсуждение результатов

Крупномасштабные процессы изменчивости зимней поверхностной температуры Баренцева и Черного морей регулируются циркуляцией атмосферы в Атлантико-Европейском секторе, междесятилетия перестройка которой происходит под воздействием Азорского и Сибирского максимумов атмосферного давления [22, 23]. Предварительные оценки показывают, что междесятилетия изменчивость циркуляции атмосферы в регионах Восточной Европы находится преимущественно под влиянием Азорского или Сибирского центров действия атмосферы. Проиллюстрируем этот процесс на примере аномалии приземного давления, наблюдавшейся в ряде лет с отрицательными значениями индекса АМО («холодная» Северная Атлантика). Композитные карты аномалии приземного давления строились для положительных и отрицательных значений САК (рис. 7). Осреднение проводилось по тем же годам, что и для построения карт на рис. 5.



**Рис. 7.** Аномалия приземного давления в ряде лет с отрицательными (*a*) и положительными (*b*) значениями индекса САК в десятилетия с отрицательными значениями индекса АМО

**Fig. 7.** Surface pressure anomaly in a number of years with the NAO index negative (*a*) and positive (*b*) values during the decades when the AMO index values are negative

В годы ослабленного Азорского максимума (отрицательный индекс САК) усиливается влияние Сибирского максимума (рис. 7). Результатом такой перестройки циркуляции атмосферы является предполагаемое понижение поверхностной температуры Северной Атлантики (см. рис. 1) и увеличенное поступление атлантических вод в западный сектор Арктики [8, 9]. Одновременно с этим интенсификация Сибирского максимума создает условия блокирования западного переноса на Европейской территории России [22, 23],

а ослабление Азорского максимума (см. рис. 2) приводит к сдвигу ВФЗ на юг на меридиане 30° в. д. Таким образом, в этой фазе междесятилетней изменчивости индексов САК и АМО траектории циклонов проходят вблизи Черного моря. На рис. 7 хорошо видно, что ослабление Азорского максимума создает условия для преобладания пониженного давления над центральной и южной Европой, что способствует углублению циклонов и формированию повышенной зимней температуры Черного моря.

В десятилетия хорошо развитого Азорского максимума (положительный индекс САК) и ослабленного Сибирского максимума предполагается повышение температуры поверхности Северной Атлантики (см. рис. 1). Это приводит к поступлению более теплых атлантических вод в Баренцевом море и к повышенной циклонической активности в регионе Норвежского и Баренцева морей [20]. В фазу междесятилетней изменчивости Азорского и Сибирского максимумов в регионе Норвежского и Баренцева морей создаются условия для формирования пониженного атмосферного давления, что способствует углублению циклонов в этом регионе и повышению зимней поверхностной температуры в Баренцевом море (рис. 7). Одновременно с этим увеличение индекса САК приводит к сдвигу ВФЗ к северу на долготях Черного моря (см. рис. 2), что создает условия для формирования отрицательных аномалий его зимней поверхностной температуры.

### Заключение

Предварительно можно сделать вывод, что циркуляция атмосферы в Атлантико-Европейском секторе (индекс САК) является основным механизмом, регулирующим АПТ Северной Атлантики, Баренцева и Черного морей. При этом как в ряде лет с отрицательными, так и в ряде лет с положительными значениями индекса АМО при положительных значениях индекса САК температура поверхности Баренцева моря становилась выше, а Черного моря – ниже климатической нормы. При отрицательных значениях индекса САК температура поверхности Баренцева моря становилась ниже, а Черного моря – выше климатической нормы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sorteberg A., Kvamstø N. G., Byrkjedal Ø.* Wintertime Nordic Seas cyclone variability and its impact on oceanic volume transports into the Nordic Seas // *The Nordic Seas: An Integrated Perspective*. Washington, D.C. : American Geophysical Union, 2005. P. 137–156. (Geophysical Monograph Series ; vol. 158). doi:10.1029/158GM10
2. *Hurrell J. W., Deser C.* North Atlantic climate variability: The role of the North Atlantic Oscillation // *Journal of Marine Systems*. 2009. Vol. 78, iss. 1. P. 28–41. doi:10.1016/j.jmarsys.2008.11.026
3. *Нестеров Е. С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М. : Триада Лтд, 2013. 144 с.
4. Изменения климата в морской Арктике в начале XXI века / Г. В. Алексеев [и др.] // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010. № 3 (86). С. 22–34.
5. Изменение климата Арктики при глобальном потеплении / Г. В. Алексеев [и др.] // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. № 1 (103). С. 32–41.

6. *Смирнов А. В., Кораблев А. А., Вязилова А. Е.* Сезонная и межгодовая изменчивость термохалинных характеристик вод в районе корабля погоды «Майк» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 2 (100). С. 25–32.
7. Variability of the intermediate Atlantic water of the Arctic Ocean over the Last 100 Years / I. V. Polyakov [et al.] // *Journal of Climate*. 2004. Vol. 17, iss. 23. P. 4485–4497. doi:10.1175/JCLI-3224.1
8. Северо-Атлантическое колебание – доминирующий фактор изменчивости циркуляционных океанических систем Северной Атлантики / Г. С. Дворянинов [и др.] // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466, № 3. С. 345–349. doi:10.7868/S0869565216030208
9. *Михайлова Н. В., Баянкина Т. М., Сизов А. А.* Два режима взаимодействия атмосферы и океана в атлантическом секторе Арктического бассейна // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 4. С. 509–516. doi:10.31857/S0030157421030096
10. *Enfield D. B., Cid-Serrano L.* Secular and multidecadal warmings in the North Atlantic and their relationships with major hurricane activity // *International Journal of Climatology*. 2010. Vol. 30, iss. 2. P. 174–184. doi:10.1002/joc.1881
11. *Yashayaev I., Seidov D.* The role of the Atlantic water in multidecadal ocean variability in the Nordic and Barents Seas // *Progress in Oceanography*. 2015. Vol. 132. P. 68–127. doi:10.1016/j.pocsea.2014.11.009
12. *Семенов В. А., Черенкова Е. А.* Оценка влияния атлантической мультидекадной осцилляции на крупномасштабную атмосферную циркуляцию в атлантическом секторе в летний сезон // Доклады Академии наук. 2018. Т. 478, № 6. С. 697–701. doi:10.7868/S0869565218060178
13. *Крашенинникова С. Б., Крашенинникова М. А.* Причины и особенности долговременной изменчивости ледовитости Баренцева моря // *Лед и снег*. 2019. Т. 59, № 1. С. 112–122. doi:10.15356/2076-6734-2019-1-112-122
14. Крупномасштабные особенности синхронной изменчивости зимней поверхностной температуры в Баренцевом и Черном морях / А. А. Сизов [и др.] // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 501, № 1. С. 108–112. doi:10.31857/S2686739721110141
15. Decadal and interannual SST variability in the tropical Atlantic Ocean / J. A. Carton [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. Vol. 26, iss. 7. P. 1165–1175. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<1165:DAISVI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<1165:DAISVI>2.0.CO;2)
16. *Xie S.-P., Tanimoto Y.* A pan-Atlantic decadal climate oscillation // *Geophysical Research Letters*. 1998. Vol. 25, iss. 12. P. 2185–2188. <https://doi.org/10.1029/98GL01525>
17. *Сизов А. А., Чехлан А. Е.* Аномалии гидрометеорологических полей в районе Черного моря, связанные с градиентами температуры поверхности воды в Северной Атлантике // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 7. С. 65–74.
18. *Breeden M. L. and McKinley G. A.* Climate impacts on multidecadal  $p\text{CO}_2$  variability in the North Atlantic: 1948–2009 // *Biogeosciences*. 2016. Vol. 13, iss. 11. P. 3387–3396. doi:10.5194/bg-13-3387-2016
19. *Serykh I. V.* Influence of the North Atlantic dipole on climate changes over Eurasia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 48 : International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modelling and Information Systems (ENVIROMIS-2016). 012004. doi:10.1088/1755-1315/48/1/012004
20. *Золотокрылин А. Н., Михайлов А. Ю., Туткова Т. Б.* Влияние притока теплых атлантических вод на аномалии климата в атлантическом секторе Арктики // *Лед и снег*. 2015. Т. 55, № 3. С. 73–82. doi:10.15356/2076-6734-2015-3-73-82
21. *Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В.* Региональные особенности синоптической изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря по спутниковым данным // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 2. С. 202–213. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-202-213

22. Семенов Е. К., Соколичина Н. Н., Соколичина Е. В. Синоптические условия формирования и развития новороссийской боры // Метеорология и гидрология. 2013. № 10. С. 16–28.
23. Семенов Е. К., Соколичина Н. Н., Тудрий К. О. Теплая зима в российской Арктике и аномальные холода в Европе // Метеорология и гидрология. 2013. № 9. С. 43–54.

*Об авторах:*

**Сизов Анатолий Александрович**, старший научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 7443-9446 AuthorID: 856808, WoS ResearcherID: S-1481-2019, ORCID ID: 0000-0001-9055-768**, sizov\_anatoliy@mail.ru

**Баянкина Татьяна Михайловна**, научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 1066-7128 AuthorID: 825808, WoS ResearcherID: G-2535-2019, ORCID ID: 0000-0002-7394-7110**, bayankina\_t@mail.ru

**Посошков Владимир Леонидович**, научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 7634-9828 AuthorID: 854854, ORCID ID: 0000-0002-3891-2772**, vla\_po@mail.ru

**Анисимов Анатолий Евгеньевич**, старший научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 1645-7874 AuthorID: 630799, WoS ResearcherID: ABA1705-2020, ORCID ID: 0000-0002-5530-5608**, anisimov1@mail.ru

## Учет локальных волновых и морфодинамических процессов в прибрежном гидротехническом строительстве

В. В. Фомин <sup>✉</sup>, Ю. Н. Горячкин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

<sup>✉</sup> v.fomin@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 08.02.2022; одобрена после рецензирования 21.02.2022;  
принята к публикации 15.03.2022.

### Аннотация

*Цель.* Оценки параметров волн в прибрежных акваториях имеют большое практическое значение для проектирования и эксплуатации объектов береговой инфраструктуры. В работе на примере района Сакской пересыпи (Западный Крым) излагается опыт исследования волновых и морфодинамических процессов в береговой зоне применительно к задачам проектирования и строительства защитных гидротехнических сооружений.

*Методы и результаты.* Для математического моделирования волновых и морфодинамических процессов в исследуемом районе использовались: спектральная модель ветрового волнения SWAN, гидродинамическая модель SWASH, комплексная морфодинамическая модель XBeach, интегральная модель эволюции береговой зоны GenCade. Волновой режим анализировался с использованием 41-летних временных рядов (1979–2019 гг.) волновых параметров, полученных на основе ретроспективных расчетов ветрового волнения по модели SWAN и данных атмосферного реанализа ERA. Получены оперативные и экстремальные характеристики ветрового волнения. Проведено моделирование пространственной структуры волновых полей для разных типов ветровых воздействий. Показано, что наиболее интенсивное волнение возникает при юго-западном ветре. Даны оценки высоты и длины наката волн на берег. Проведены расчеты деформаций профиля береговой зоны для штормов разной длительности. Получены значения суммарного за год вдольберегового потока наносов на участке проектирования за период 1979–2019 гг. Установлено, что в 70% случаев поток наносов направлен в сторону евпаторийского побережья.

*Выводы.* Исследования показали, что пренебрежение научно обоснованными рекомендациями при проектировании объектов прибрежной инфраструктуры может привести к нарушению существующей природной системы формирования береговой зоны и к существенным негативным последствиям для берега на участке протяженностью до 10 км. Эти последствия могут быть выражены в сокращении ширины пляжной зоны, понижении высотных отметок, в замене на некоторых участках песка на галечно-гравийные фракции, что ухудшает рекреационные свойства пляжей. С учетом планового расположения основания ограждающей стены на отдельных участках возможен подмыв и повреждение стены набережной. Эти выводы подтвердились на практике уже в ходе строительства объекта. По результатам проведенной работы были даны рекомендации по исключению из проекта сооружений, возведение которых может привести к существенным негативным изменениям в морфодинамике береговой зоны.

**Ключевые слова:** береговая зона, антропогенное воздействие, волновой режим, морфодинамика, Крым, Сакское озеро, пересыпь, математическое моделирование, SWAN, SWASH, XBeach, GenCade

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания Морского гидрофизического института РАН № 0555-2021-0005.


© Фомин В. В., Горячкин Ю. Н., 2022

Для цитирования: Фомин В. В., Горячкин Ю. Н. Учет локальных волновых и морфодинамических процессов в прибрежном гидротехническом строительстве // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 291–311. doi: 10.22449/0233-7584-2022-3-291-311

## Accounting for the Local Wave and Morphodynamic Processes in Coastal Hydraulic Engineering

V. V. Fomin , Yu. N. Goryachkin

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

 v.fomin@mhi-ras.ru

### Abstract

**Purpose.** Estimates of wave parameters in the coastal waters are of great practical importance for designing and operating coastal infrastructure facilities. On the example of the Saki bay-bar region (Western Crimea), the experience of studying the wave and morphodynamic processes in the coastal zone is presented being applied to the tasks of designing and building protective hydraulic structures.

**Methods and Results.** Mathematical modeling of the wave and morphodynamic processes in the area under study was done using the following: spectral model of the wind waves *SWAN*, hydrodynamic model *SWASH*, complex morphodynamic model *XBeach* and integral model of the coastal zone evolution *GenCade*. The wave regime was analyzed using the 41-year time series (1979–2019) of wave parameters resulted from the retrospective calculations of wind waves based on the *SWAN* model and the *ERA* atmospheric reanalysis data. The operational and extreme characteristics of wind waves were obtained. Spatial structure of the wave fields for different types of the wind effects was modeled. The most intense waves are shown to occur during the southwest wind. The height and length of wave run-up on the coast and the coastal zone profile deformations for the storms of different durations were estimated. The values of the total annual along-coastal sediment flow in the design area were obtained for 1979–2019. In 70% of the cases, the sediment flow was established to be directed towards the Evpatoriya coast.

**Conclusions.** The studies have shown that neglecting scientifically based recommendations when designing coastal infrastructure facilities can lead both to disruption of the existing system of the coastal zone natural formation, and to significant negative consequences for the coastline of almost 10 km length. These consequences can be manifested in a reduction of the beach zone width, a decrease in elevation marks and replacement of sand with the pebble-gravel fractions in some areas that worsen recreational features of the beaches. Having been analyzed and taken into account, the planned location of the base of the enclosing wall shows that in some parts, the embankment wall can be possibly washed away and damaged. These conclusions were confirmed in practice already during the facility construction. Based on the results of the performed study, the constructions contributing significantly to the changes in the coastal zone morphodynamics were recommended for exclusion from the project.

**Keywords:** coastal zone, anthropogenic impact, wave regime, morphodynamics, Crimea, Sakscoe Lake, bay-bar, mathematical modeling, *SWAN*, *SWASH*, *XBeach*, *GenCade*

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the state assignment of Marine Hydrophysical Institute, RAS No. 0555-2021-0005.

**For citation:** Fomin, V.V. and Goryachkin, Yu.N., 2022. Accounting for the Local Wave and Morphodynamic Processes in Coastal Hydraulic Engineering. *Physical Oceanography*, 29(3), pp. 271-290. doi:10.22449/1573-160X-2022-3-271-290

### Введение

Южный (ЮБК) и западный берег Крымского п-ова являются двумя основными курортными районами, каждый из которых принимает примерно 40% всего потока отдыхающих. Если возможности расширения рекреационных зон на ЮБК практически исчерпаны, то Западный Крым потенциально

может их существенно наращивать, что выразилось в создании в настоящее время ряда проектов дальнейшего развития этого региона. Один из таких проектов под названием «Строительство пешеходной набережной вдоль улицы Морская, Республика Крым, г. Саки», к сожалению, предусматривает серьезное вмешательство в природные процессы береговой зоны пересыпи оз. Сакское, ранее уже подвергавшейся негативному антропогенному воздействию.

Вполне очевидно, что при реализации такого рода проектов необходимо учитывать особенности природных условий конкретного района побережья и ранее полученный опыт его хозяйственного освоения. Это, к сожалению, не было сделано проектировщиками, несмотря на неоднократные предупреждения со стороны научных организаций Крыма. Вследствие проявившегося явного отрицательного воздействия на береговую зону строительство было приостановлено, а проект отправлен на доработку.

Целью настоящей работы является анализ антропогенного воздействия на береговую зону в районе пересыпи оз. Сакское, получение характеристик волнового режима и морфодинамики на основе натурных данных и современных методов математического моделирования.

#### **Ретроспективный анализ реакции береговой зоны участка проектирования на антропогенные воздействия**

Основные и старейшие курорты Западного Крыма – города Евпатория и Саки, расположенные на берегах Каламитского залива, который дугой длиной ~ 60 км протянулся от м. Евпаторийский до м. Лукулл (рис. 1). Берега залива образуют абразионно-аккумулятивную пару. Южная половина представлена абразионным берегом с обрывистым клифом (высотой до 15 м), сложенным красно-бурыми глинами, с включением горизонтов галечных конгломератов. Разрушение клифов в настоящее время наряду с донной абразией является основным источником наносов береговой зоны [1]. Средняя скорость отступания клифа 0,5–1 м/год [2]. Наносы южной части питают северную половину залива, побережье которого представляет собой часть единого аккумулятивного образования от м. Карантинный до оз. Кызыл-Яр. Ранее значительную долю питания пляжей составляло поступление аллювия из рек, однако с их зарегулированием в 70-х гг. прошлого века оно стало играть незначительную роль в балансе наносов.

Пересыпь оз. Сакское, сложенная песчано-галечниковым материалом, представляет собой замыкающую аккумулятивную береговую форму. Такие формы образуются в результате поперечного перемещения и выбрасывания наносов со дна в процессе вдольбереговых миграций наносов в местах торможения потока наносов или при комбинированном действии указанных процессов и являются относительно стабильным элементом береговой зоны. Вместе с тем в течение последних 90 лет пересыпь претерпела ряд антропогенных воздействий, в результате чего береговая линия значительно отступила, а пляжи испытали деградацию.



**Р и с. 1.** Карта-схема северной части Каламитского залива. На врезке – расположение бун № 1 и 2 (обозначено римскими цифрами I и II); желтыми цифрами обозначены: детский центр «Арт-Квест» – 1; санаторий «Юрмино» – 2; база отдыха «Уют» – 3; санаторий «Полтава» – 4; пансионат «Парус» – 5

**F i g. 1.** Schematic map of the Kalamitsky Bay northern part. The inset shows the location of buns No. 1 and 2 (indicated by Roman numerals I and II); yellow numbers denote: children center “Art-Quest” – 1; sanatorium “Yurmino” – 2; recreation center “Uyut” – 3; sanatorium “Poltava” – 4; boarding house “Sail” – 5

Еще в середине XX в. здесь были пляжи полного профиля с дюнным ландшафтом, высота пересыпи над уровнем моря составляла 1,5–5 м [3]. Непосредственной причиной сокращения пляжей стала добыча на них песка, которая началась в 30-е гг. в период строительства ДнепроГЭСа (песок отличался очень высоким качеством). Тогда она локализовалась в основном у с. Прибрежное. Максимума добыча достигла в 50-е гг., когда шла интенсивная разработка Прибреженского месторождения песчано-гравийной смеси, включавшего пересыпи озер Сасык и Сакское. Песок использовался для строительства не только в Крыму, он вывозился железнодорожным транспортом и морем в Одессу и другие порты. Перемычки, отделявшие карьеры от моря, стали узкими и выгнулись в сторону карьера, при этом наблюдалось сокращение ширины пляжей. Максимальное отступление береговой линии составило ~ 120 м. В феврале – марте 1953 г. муниципальная комиссия пришла к заключению, что ни на Сасыкской, ни на Сакской пересыпи не могут быть допущены дальнейшие разработки песка и гравия. Тем не менее добыча продолжалась еще несколько лет.

В то время на пересыпи оз. Сакское практически не было никаких строений, которым бы угрожало отступление берега, однако в связи с реаль-



ной опасностью прорыва пересыпи морем, изменения солености рапы в лечебном озере и утраты лечебных свойств грязей Сакского курорта карьеры на суше были закрыты.

Вместе с тем добыча песка путем его рефулирования со дна моря была продолжена, при этом ситуация ухудшалась, вдольбереговой поток наносов практически полностью перехватывался, в результате чего берег стал интенсивно отступать. В это же время было отмечено уменьшение пляжей в г. Евпатория, и в начале 60-х гг. добыча песка была полностью прекращена. Общий объем добытого песка<sup>1</sup> оценивался величиной ~ 15 млн. м<sup>3</sup>. Подведенная сюда железнодорожная ветка для вывоза песка, впоследствии модернизированная, сохранилась местами до сих пор. На месте разработок песка вместо находившихся здесь песчаных дюн образовались соленые озера и заболоченные участки (засухи), частично впоследствии засыпанные и застроенные.

После закрытия карьеров до начала 80-х гг. прошлого века берег постепенно стабилизировался. Однако затем он стал стремительно размываться и за 1983–2006 гг. на Сакской пересыпи отступил на 18–33 м. Непосредственной причиной этого стало строительство в 1982 г. в районе пгт Новофедоровка защитного сооружения водозабора объекта НИТКА. Он представляет собой с южной стороны выдвинутый в море поперечный берегу сплошной железобетонный мол Г-образной формы, с северной стороны – прямолинейный мол. Сооружение перехватило идущий с юга вдольбереговой поток наносов. В результате южнее сооружения наносы стали аккумулироваться и береговая линия с течением времени выдвинулась на всю его длину – 80 м. Севернее водозабора началось интенсивное отступление берега, наблюдалось классическое явление низового размыва, вследствие которого пострадала значительная часть побережья.

Так, в районе детского центра «Арт-Квест» (показан цифрой 1 на врезке рис. 1) берег скачкообразно отступил в течение 1984–1985 гг. на 10 м. В 1989 г. в качестве защиты была построена вертикальная стенка, но к 1999 г. она разрушилась, в конечном итоге берег здесь отступил на 29 м.

В районе от детского центра «Арт-Квест» до пансионата «Парус» (показан цифрой 5 на врезке рис. 1) за период 1983–2006 гг. средняя величина отступления берега составила 18 м. Пострадали и другие районы этого побережья. На территории санатория «Юрмино» и базы отдыха «Уют» (цифры 2 и 3 на врезке рис. 1) к 2011 г. береговая линия отступила на 24–33 м по сравнению с 1983 г. В результате к концу 80-х гг. прошлого века практически весь участок нынешнего проектирования и строительства был признан аварийным. В попытке предотвратить разрушение различных построек, оказавшихся в прибойной зоне, на территории отдельных здравниц применялись набросные поперечные сооружения, удерживающие пляж, защитные наброски из различных материалов, стенки с волногасящими камерами из щелевых плит и стенки из полимерных материалов. На зимний

---

<sup>1</sup> Шуйский Ю. Д., Плотникова К. И., Выхованец Г. В. Динамика береговой зоны в районах месторождений твердых полезных ископаемых // Основные проблемы геологии, разведки и добычи полезных ископаемых шельфовой зоны Мирового океана : Материалы респ. конф. Киев : Наукова думка, 1982. С. 119–127.

период в качестве барьеров для волн возводились песчаные валы в сочетании с траншеями. Хотя эти меры не решали проблему в целом, все же в штормовой сезон они позволяли в некоторой степени защитить примыкающие к пляжу территории. Однако локальная защита берега приводила к размыву других участков.

В качестве примера опишем последствия строительства в 2008 г. на территории санатория «Полтава» (показан цифрой 4 на врезке рис. 1) комплекса берегозащитных сооружений, состоящего из вертикальной стенки и двух гравитационных бун, ограничивающих основной пляж. В результате сооружения бун средняя ширина пляжа стала увеличиваться и достаточно быстро стабилизировалась на отметках 30–35 м. Искусственное пополнение объемов пляжного материала не производилось. Заполнение межбунного пространства пляжа и некоторое увеличение его ширины южнее произошло в результате перехвата части вдольберегового потока наносов, направленного с юга на север, что привело к интенсивному низовому размыву.

В первые месяцы после завершения строительства на территории, примыкающей к санаторию «Полтава» с севера, ширина пляжа сократилась до 8–10 м, что вызвало разрушение ветровыми волнами берегового уступа в его тыловой части. К концу 2011 г. берег здесь отступил на 25 м от исходного положения. Зона интенсивного размыва берегового откоса наиболее отчетливо прослеживалась на расстоянии ~ 250 м к северу от северной буны. На этом участке произошло полное разрушение полосы кустарниковых насаждений и прогулочной набережной. Одновременно происходили подмыв и разрушение ограничительной каменной стенки пляжа. К югу от бун наблюдалось увеличение и стабилизация ширины пляжа на длине ~ 800 м. Таким образом, наглядно проявилось, что наряду с сезонной и межгодовой изменчивостью направлений вдольберегового потока наносов его преобладающее направление – с юга на север.

В начале 2000-х гг. существовало несколько планов восстановления пляжей пересыпи, которые не были осуществлены. Так, по одному из проектов планировалась отсыпка свободного искусственного пляжа длиной 2800 м.

### **Критический анализ существующих проектных решений**

Целью проекта, разработанного в 2016 г. ООО «Берегозащита» (г. Краснодар), являлось строительство набережной длиной 5600 м, а также расширение пляжной зоны на центральном участке проектирования (протяженность ~ 2400 м), где ширина пляжа составляла 10–30 м и волновому воздействию подвергались стена набережной и береговые строения. Здесь мы не будем останавливаться на представляющей сомнительной идее строительства набережной, а отметим только те решения, которые касаются непосредственно береговой зоны. Проектировщиками были выполнены изыскания, полнота и качество которых представляются спорными. Основным выводом, на котором базировался выбор конструктивной схемы устройства берегозащитных сооружений, заключался в том, что потоки наносов на участке проектирования в среднем за год сбалансированы и результирующий поток близок к нулю. Проектом было определено строительство по границам центрального участка двух бетонных поперечных сооружений (буны № 1 и 2, рис. 1) длиной

~ 120 м каждое. На центральном участке предусматривалась отсыпка пляжа шириной 35 м с заменой существовавших песчано-галечных фракций (0,25–10,0 мм [4]) гравийно-валунными (70–80 мм), что резко ухудшало рекреационные свойства пляжа. Со стороны моря этот участок планировалось защитить от волнового воздействия десятью прерывистыми бетонными волноломами, параллельными берегу. Севернее и южнее уже существующих построек здравниц на месте дюн природного пляжа была запроектирована оградительная стена набережной. Предполагалось, что на этих участках не будет происходить изменений ширины и высотных отметок пляжа. В связи с этим не предусматривалось отсыпок пляжного материала и проведения иных берегоукрепительных мероприятий на северном и южном участках.

Несмотря на критику проектных решений, прозвучавшую в ходе общественных слушаний со стороны Морского гидрофизического института (МГИ) РАН, к началу 2020 г. были выполнены следующие строительные-монтажные работы: построены стена набережной на южном и северном участках, корневые части бун длиной 63 м (№ 1) и 42 м (№ 2), выполнена отсыпка пляжа на участке между южной и северной бунами в объеме, достоверная информация о котором отсутствует.

Вскоре после начала строительства выявились отрицательные последствия проектных решений. В целях исследования влияния построенных участков на литодинамику нами были выполнены натурные наблюдения подводного и надводного рельефа, сравнение профилей на контрольных створах и предварительная оценка изменения фракционного состава наносов. На основе полученных результатов установлено, что частично построенные буны существенно влияют на трансформацию береговой полосы как выше линии уреза, так и на глубинах до 4,0–4,5 м.

Необходимо отметить, что до строительства буны № 2 (2019 г.) на участках расположения объектов рекреации (детский центр «Арт-Квест», санаторий «Юрмино», база отдыха «Уют») были построены сооружения в активной зоне пляжа, при этом уменьшившейся ширины пляжа было недостаточно для полного гашения волновой энергии. В период 2020–2021 гг. отмечена практически полная потеря пляжа на этих участках (рис. 2). При этом галечно-гравийный материал начал накапливаться с южной стороны буны № 2, а песок отмываться волнением и перемещаться в сторону открытого моря.

Вследствие изменения гранулометрического состава (уменьшение содержания песчаной фракции) на участке южнее буны № 2 произошло понижение высотных отметок и уменьшение ширины пляжа. Частично построенная буна, а также наличие дополнительных препятствий в виде остатков технологической бермы и брошенного на объекте понтона блокировали поток наносов, имеющий здесь генеральное вдольбереговое направление с юга на север. Также отмечались размыв северного угла у буны № 1 и выдвигание галечного пляжа с южной стороны.

В связи с обоснованной тревогой владельцев прибрежных сооружений за сохранность пляжей, а также в связи с реальной угрозой подмыва основания построенной оградительной стены Морским гидрофизическим институтом РАН была инициирована работа по анализу проекта в части, касающейся строительства в береговой зоне.



**Р и с. 2.** Вид берега в районе санатория «Юрмино» (январь 2022 г.)

**Fig. 2.** View of the coast in the region of the sanatorium “Yurmino” (January, 2022)

### **Используемые математические модели**

При проектировании гидротехнических сооружений в береговой зоне, как правило, используются расчетные методики из нормативных документов. В своем большинстве эти методики разработаны на основе простых аналитических решений, в них используются серьезные упрощения рассматриваемых процессов. В конкретных инженерно-гидрометеорологических изысканиях применение указанных методик не всегда возможно, что часто приводит к необходимости привлечения численных моделей с целью получения более точных оценок необходимых для проектирования параметров.

Многолетний опыт МГИ в исследовании динамики береговых процессов дал возможность выделить набор численных моделей, позволяющих решать широкий круг задач, необходимых при проектировании берегозащитных сооружений. Как показывает практика, разумная комбинация нормативных методик и численных моделей может давать более надежные и объективные оценки параметров, необходимых для проектирования гидротехнических сооружений.

Рассматриваемый ниже набор моделей неоднократно применялся МГИ в рамках научно-технического сопровождения проектов гидротехнического строительства в береговой зоне Крыма. Главными критериями выбора моделей являются: открытость и свободное распространение исходных кодов; всесторонняя апробация моделей и их общепризнанность международным

научным сообществом; наличие хорошо разработанной документации для пользователей.

В качестве основного инструмента для моделирования волнения в береговой зоне используется численная спектральная модель *SWAN* [5], которая учитывает: генерацию волн приземным ветром; обрушение волн на глубокой воде; нелинейное взаимодействие волновых гармоник на глубокой и мелкой воде; рефракцию на неоднородностях рельефа дна; обрушение волн на глубокой воде; донное трение и обрушение волн на критических глубинах.

Основной технологической проблемой при моделировании волнения в прибрежных районах является правильное задание характеристик волн, приходящих из открытого моря. Для этого обычно используются неструктурированные сетки со сгущением в прибрежной зоне или прямоугольные вложенные сетки.

В настоящей работе был реализован 4-шаговый метод вложенных прямоугольных сеток: на первом шаге моделируются поля волнения во всем Черноморском бассейне; на втором шаге волнение рассчитывается в области, включающей Каламитский залив; на третьем шаге рассчитываются поля волнения в северной части Каламитского залива; на четвертом шаге моделируются поля волнения на подходах к исследуемому району. На втором, третьем и четвертом шагах параметры ветровых волн на жидких границах расчетных областей определяются интерполяцией модельных данных, полученных на предыдущем шаге. Такой подход дает возможность получить поля ветровых волн с различной детализацией и на различном удалении от исследуемого района.

Для расчета волновых течений и волнового нагона применялась численная гидродинамическая модель *SWASH* [6], которая позволяет проводить моделирование в широком диапазоне пространственно-временных масштабов с учетом рефракции, дифракции и отражения волн. В модели учитываются турбулентное перемешивание, донное трение, обрушение волн, процессы затопления – осушения береговой зоны. В качестве граничных условий на морской границе могут быть использованы данные волновой модели *SWAN*.

Решение морфодинамических задач в масштабах длительности отдельных штормов или штормовых циклов проводилось на основе комплексной численной модели *XBeach* [7], которая позволяет одновременно проводить расчеты характеристик волнения и течений, транспорта наносов и изменений рельефа береговой зоны.

Оценки изменений береговой линии на масштабах нескольких лет выполнялись на основе интегральной модели эволюции береговой линии *GenCade* [8], основное назначение которой – определение межгодовых тенденций изменения береговой линии при разных типах берегозащитных сооружений.

С помощью указанных выше математических моделей удастся решать достаточно широкий круг практических задач, возникающих при реализации проектов хозяйственной деятельности в береговой зоне.

Ниже представлены некоторые из результатов математического моделирования волновых и морфодинамических процессов, полученных МГИ в рамках научно-исследовательской работы по выработке рекомендаций для

выбора типов и схем размещения берегозащитных сооружений на участке строительства набережной в районе пересыпи оз. Сакское.

### Региональный ветроволновой климат

Первым шагом при решении задач проектирования берегозащитных сооружений является получение статистических характеристик волнения в исследуемом районе. Для этого обычно применяются многолетние ряды срочных наблюдений волнения на ближайших морских гидрометеостанциях (МГ), репрезентативных по отношению к исследуемому району. Для района пересыпи оз. Сакское применение данных наблюдений волнения на МГ «Евпатория» (которые использовались ООО «Берегозащита») не вполне корректно, поскольку МГ расположена в полузакрытой бухте и не характеризует волновой режим исследуемого района.

Выходом из этого положения является использование данных ретроспективных расчетов волнения за многолетний период. В МГИ имеется массив данных ретроспективных расчетов параметров ветровых волн в Черном море за период 1979–2019 гг. (далее – массив *SWAN-ERA*) с дискретностью по времени 1 ч. Массив получен с помощью модели *SWAN* на неструктурированной расчетной сетке со сгущением в прибрежной зоне [9]. Атмосферным форсингом модели служили данные глобальных атмосферных реанализов *ERA-Interim* и *ERA5* (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts>). Из массива *SWAN-ERA* был выбран ближайший к пересыпи оз. Сакское узел расчетной сетки с глубиной ~ 9 м и сформированы многолетние ряды волновых параметров, включающих высоту значительных волн  $h_s$ , средний период волн  $\bar{\tau}$ , среднее направление волнения  $\theta$ , пиковый период волн  $\tau_p$ .

На основе этих рядов были рассчитаны оперативные и экстремальные характеристики волнения<sup>2</sup>: оперативные характеристики определяют фоновые условия эксплуатации объектов прибрежной инфраструктуры, экстремальные – режим предельных нагрузок на эти объекты.

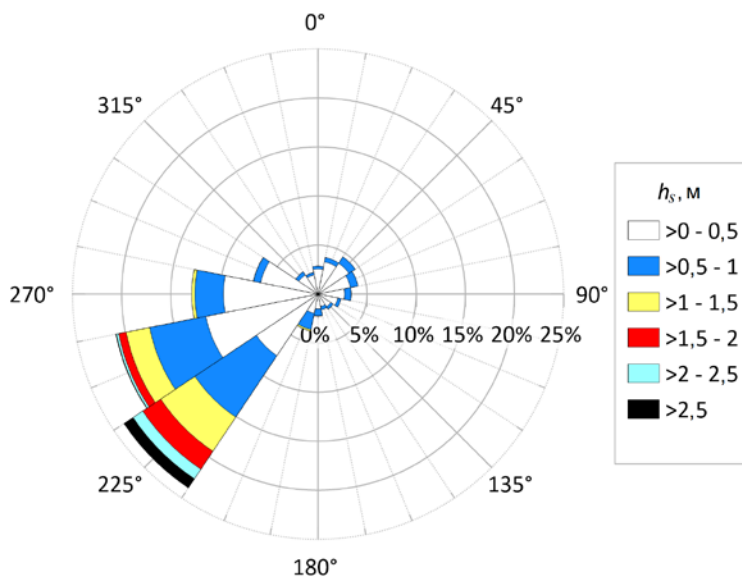
Анализ результатов расчетов оперативных характеристик показал, что с увеличением высоты волн ее повторяемость монотонно уменьшается. Около 70% всех значений  $h_s$  не превышает 0,5 м. Волны высотой  $h_s \geq 1$  м возникают в 7% случаев, а повторяемость волн высотой  $h_s \geq 2,5$  м составляет менее 1%. Наибольшая повторяемость средних периодов волн соответствует интервалу 2–3 с, в который попадает 52% всех случаев.

Со стороны моря наибольшую повторяемость (6%) имеет юго-западный ветер. При этом наиболее вероятным направлением подхода волн к берегу является юго-западное и запад-юго-западное (рис. 3).

Максимумы повторяемости направления волн соответствуют максимумам повторяемости направления ветра и обусловлены распределением глубин и рефракцией, под влиянием которой с приближением к берегу волновые фронты ориентированы параллельно изобатам. Распределение периодов волн по направлениям и градациям показывает, что волны с периодами  $\bar{\tau} \geq 7$  с под-

<sup>2</sup> Крылов Ю. М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Л. : Гидрометеоиздат, 1966. 255 с.

ходят к исследуемому району с юго-запада и юго-юго-запада, что качественно повторяет розу волнения.



**Р и с. 3.** Роза волнения по данным SWAN-ERA (глубина 9 м)  
**Fig. 3.** Wave rose according to the SWAN-ERA data (9 m depth)

На основе имеющихся волновых рядов также оценивались продолжительность штормовых ситуаций и интенсивность штормов. В качестве критерия выделения штормов использовалось условие [10]

$$h_s \geq \overline{h_s} + 2\sigma, \quad (1)$$

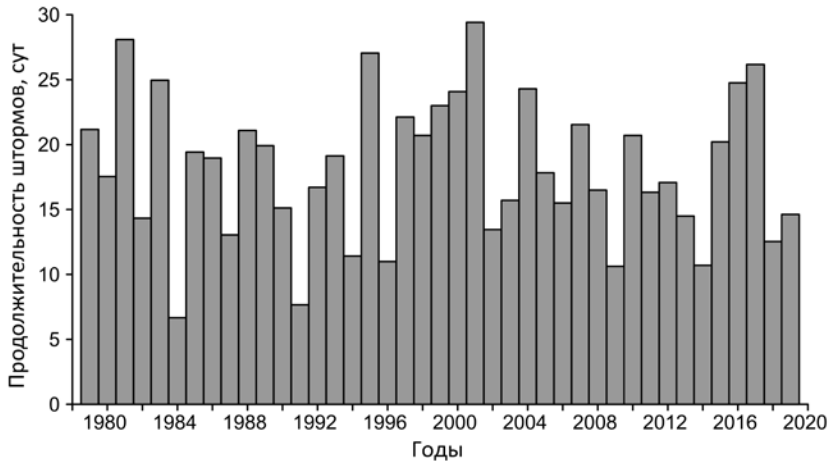
где  $\overline{h_s} = 0,54$  м – среднегодовое значение  $h_s$  для данного ряда;  $\sigma = 0,50$  м – среднеквадратическое отклонение  $h_s$  волн от  $\overline{h_s}$ . Таким образом, пороговое значение высоты волн  $h_p = 1,54$  м.

На рис. 4 приведено распределение по годам суммарной длительности штормовых ситуаций. Как видно, она изменяется в пределах 6,7–29,4 сут, а их среднее значение составляет 18,2 сут. Наиболее продолжительные штормовые ситуации возникают в декабре – январе, минимальная продолжительность штормов отмечается в июле – августе (рис. 5).

Достаточно информативной характеристикой волнения является индекс мощности шторма *SPI* (*storm power index*), рассчитываемый по формуле из работы [10]:

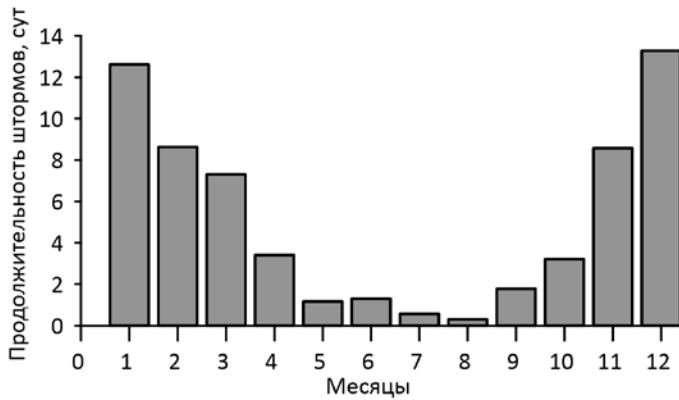
$$SPI = h_d^2 \cdot T_d, \quad (2)$$

где  $h_d$  – среднее за период шторма значение  $h_s$  (м);  $T_d$  – продолжительность шторма (ч). При расчете  $T_d$  и  $h_d$  используются значения  $h_s$ , удовлетворяющие критерию (1).



**Р и с. 4.** Распределение по годам суммарной продолжительности штормов по данным *SWAN-ERA* (глубина 9 м)

**Fig. 4.** Yearly distribution of the storm total durations according to the *SWAN-ERA* data (9 m depth)



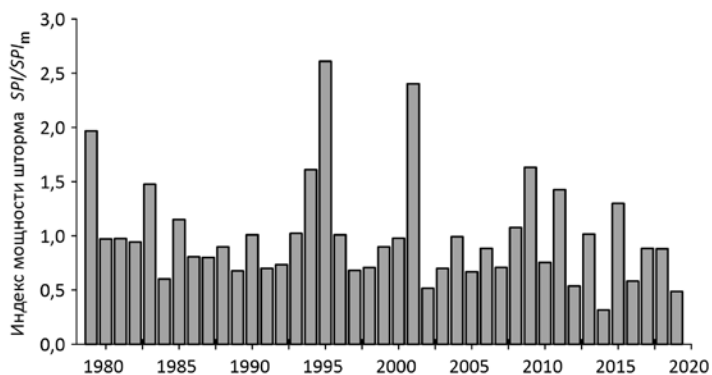
**Р и с. 5.** Распределение по месяцам средней продолжительности штормов по данным *SWAN-ERA* (глубина 9 м)

**Fig. 5.** Monthly distribution of storm mean durations according to the *SWAN-ERA* data (9 m depth)

На рис. 6 показано распределение суммарных по годам значений *SPI*, нормированных на среднемноголетнее значение  $SPI_m = 0,869 \cdot 10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}$ . На гистограмме выделяются три года (1979, 1995 и 2001) со штормовой активностью, в 2 раза большей средней. В последние 10 лет прослеживаются заметные колебания индекса штормовой активности.

Для оценки экстремальных значений средних высот волн  $\bar{h} = 0,63 \cdot h_s$  и средних периодов волн  $\bar{\tau}$ , возможных один раз в  $n$  лет, использовалось экстремальное распределение Гумбеля [9, 11], полученное на основе последовательности годовых максимумов  $\bar{h}$  и  $\bar{\tau}$  рядов *SWAN-ERA*. Затем с помощью функций распределения элементов волн для моря конечной высоты<sup>2</sup>, куда входят максимумы  $\bar{h}$  и  $\bar{\tau}$ , определялись высоты и периоды волн различной обеспеченности в системе штормов, возможных один раз в  $n$  лет.





**Рис. 6.** Распределение по годам суммарного индекса мощности шторма  $SPI$ , нормированного на его среднееголетнее значение  $SPI_m$  (глубина 9 м)

**Fig. 6.** Yearly distribution of the storm power total index  $SPI$  normalized to its average long-term value  $SPI_m$  (9 m depth)

Результаты расчетов экстремальных характеристик волнения приведены в табл. 1. Отсюда следует, что для шторма 4%-ной режимной обеспеченности (возможного один раз в 25 лет) расчетное значение высоты волн однопроцентной обеспеченности составляет 5,3 м. Эта величина, наряду со значениями  $\bar{\lambda}$  и  $\bar{\tau}$ , необходима при проектировании берегозащитных сооружений, к которым относятся сооружения типа бун и волноломов.

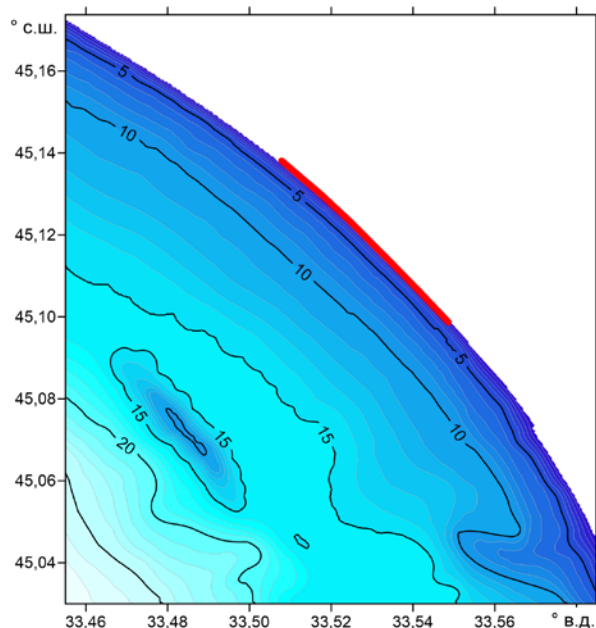
Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Высота значительных волн  $h_s$ , средняя высота волн  $\bar{h}$ , средний период волн  $\bar{\tau}$ , средняя длина волн  $\bar{\lambda}$ , высота волн 13%-, 3%- и 1%-ной обеспеченности в системе штормов, возможных один раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет (по данным SWAN-ERA, глубина 9 м)**  
**Wave significant height  $h_s$ , wave average height  $\bar{h}$ , wave average period  $\bar{\tau}$ , wave average length  $\bar{\lambda}$ , wave height of the 13% -, 3% - and 1% probability in the system of storms which are possible once per 1, 5, 10, 25, 50 and 100 years (based on the SWAN-ERA data, 9 m depth)**

$T$ , годы / $T$ , years	Волновые характеристики / Wave characteristics						
	$h_s$ , м / $h_s$ , m	$\bar{h}$ , м / $\bar{h}$ , m	$\bar{\tau}$ , с / $\bar{\tau}$ , s	$\bar{\lambda}$ , м / $\bar{\lambda}$ , m	$h_{13\%}$ , м / $h_{13\%}$ , m	$h_{3\%}$ , м / $h_{3\%}$ , m	$h_{1\%}$ , м / $h_{1\%}$ , m
1	3,4	2,0	9,2	83	3,1	3,8	4,3
5	3,7	2,3	10,2	94	3,5	4,3	4,7
10	3,7	2,5	10,8	100	3,7	4,5	5,0
25	4,0	2,6	11,5	107	3,9	4,8	5,3
50	4,0	2,8	12,0	112	4,1	5,0	5,5
100	4,2	2,9	12,5	118	4,2	5,1	5,7

## Результаты математического моделирования и их обсуждение

Перейдем к рассмотрению основных особенностей пространственной структуры волновых полей. Поля ветровых волн в исследуемом районе определяются скоростью, направлением и временем действия ветра, особенностями рельефа дна, конфигурацией береговой линии, а также значениями эффективных разгонов. Район проектирования характеризуется относительно прямолинейной береговой линией и параллельными ей изобатами (рис. 7). Таким образом, волновые поля во вдольбереговом направлении будут относительно однородными.



**Р и с. 7.** Модельный рельеф дна в районе пересыпи оз. Сакское. Красная линия – район проектирования

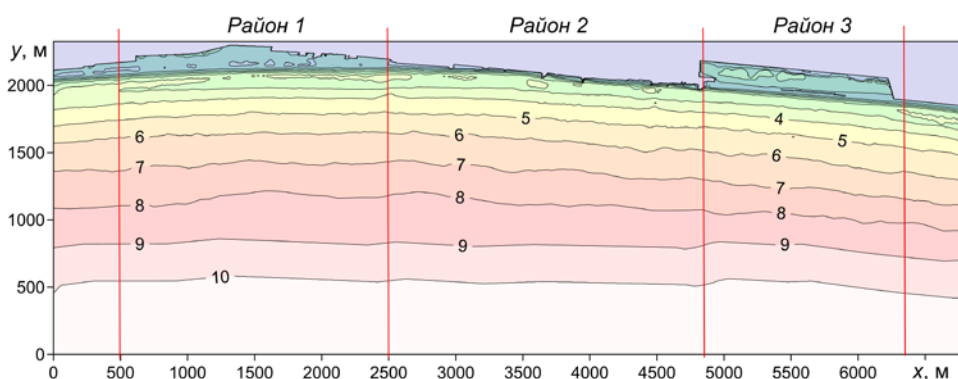
**F i g. 7.** Model bottom topography in the region of the Sakscoe Lake bay-bar. Red line shows the design area

Для моделирования полей волнения использовались модель *SWAN* и 4-шаговый метод вложенных сеток, описанный выше. Расчеты выполнялись на период времени 16 ч для однородного по пространству ветра 4%-ной режимной обеспеченности<sup>3</sup>. Для всех четырех расчетных областей угловое разрешение модели *SWAN* составляло 10°. По частотной координате, изменяющейся в диапазоне 0,04–2 Гц, использовалась неравномерная сетка с 31 узлом. В четвертой расчетной области шаг сетки составлял ~ 40 м. Интегрирование по времени проводилось по неявной разностной схеме с шагом 30 мин.

<sup>3</sup> Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Отв. исп. Л. И. Лопатухин и др. СПб. : Российский морской регистр судоходства, 2006. 450 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/91f/4293747775.pdf> (дата обращения: 12.05.2022).

Как показывают результаты моделирования, наиболее интенсивное волнение возникает при юго-западном ветре, что обусловлено максимальными разгонами. Вследствие мелководности исследуемого района существенное влияние на волны оказывает рефракция. При подходе к берегу волновые фронты ориентированы параллельно изобатам и среднее направление волн становится перпендикулярным изобатам. На изобате 10 м значения средних длин волн  $\bar{\lambda}$  находятся в пределах 70–105 м, в непосредственной близости от берега они уменьшаются до 45–55 м.

Важным фактором, определяющим потери волновой энергии за счет донного трения, является амплитуда орбитальной скорости волнового движения у дна  $V_b$  [5]. Как показали расчеты, вблизи берега (на глубинах 10 м и меньше) характерные значения  $V_b$  составляют 1,1–1,4 м/с. О потерях волновой энергии за счет обрушения волн позволяет судить пространственное распределение зон обрушения. В модели *SWAN* количественным критерием обрушения является доля разрушающихся волн  $Q_b$  [5]. Как показал анализ полей  $Q_b$ , во всех рассмотренных случаях внешняя граница зоны обрушения волн соответствует изобате  $\sim 4$  м.



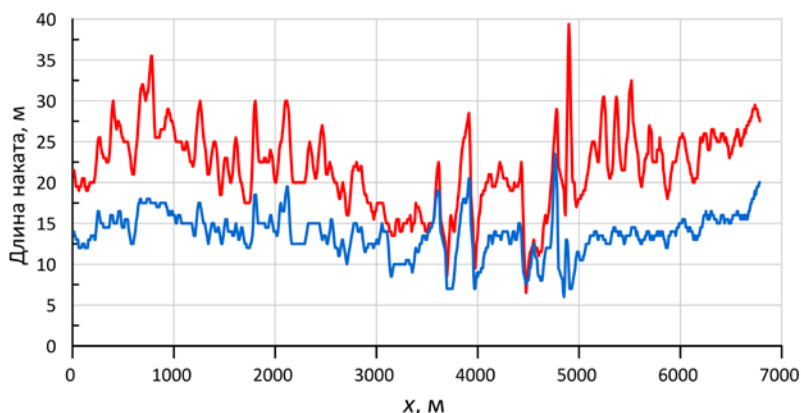
**Р и с. 8.** Рельеф дна и суши (м) береговой зоны для моделирования наката волн на берег и деформаций профиля пляжа

**F i g. 8.** Bottom and land relief (m) of the coastal zone for modeling the wave run-up on the coast and the beach profile deformations

Для оценки характеристик наката волн на берег исследуемого района использовалась модель *SWASH*. Рельеф дна расчетной области показан на рис. 8. Ось  $x$  ориентирована вдоль генерального направления береговой линии, ось  $y$  – в направлении, перпендикулярном генеральному направлению береговой линии. Использовалась сетка с шагом 6,8 м по  $x$  и 2,5 м по  $y$ . Шаг интегрирования по времени составлял 0,02 с. На мористой границе ( $y = 0$ ) расчетной области характеристики волнения определялись на основе спектра *JONSWAP* [6] при  $h_s$  и  $\tau_p$ , соответствующих шторму 4%-ной режимной обеспеченности. На жидких боковых границах задавалось условие излучения. Время интегрирования составляло 360 с. В процессе моделирования для каж-

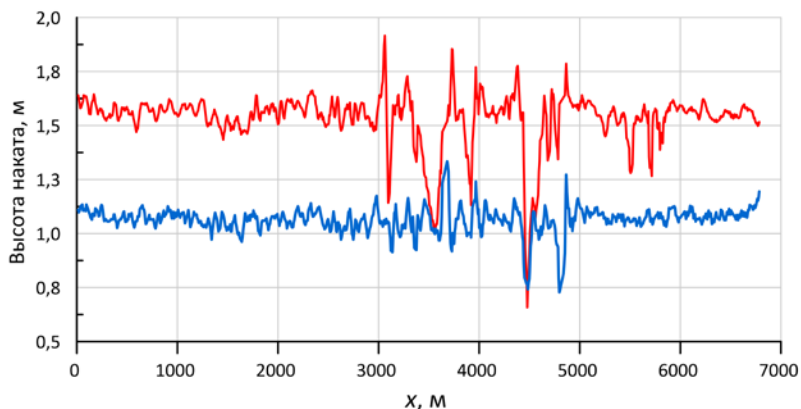
дого  $x$  определялись максимально возможные значения длины и высоты наката.

Были выполнены расчеты максимальных длин и высот наката волн на берег с условием гидростатики (вариант ГМ) и без этого условия (вариант НМ). Результаты моделирования показаны на рис. 9 и 10. Красные кривые соответствуют негидростатическому варианту *SWASH*, голубые кривые – гидростатическому. Как видно, длина и высота наката значительно меняются вдоль береговой линии, что обусловлено непостоянством уклонов дна и уклонов надводной части пляжа на разных участках района проектирования, а также наличием волноотбойной стенки и других берегозащитных сооружений.



**Р и с. 9.** Максимальная длина наката вдоль побережья исследуемого района для шторма 4%-ной режимной обеспеченности. Красная кривая – негидростатическая модель, голубая кривая – гидростатическая модель

**F i g. 9.** Run-up maximum length along the coast of the area under study for a storm of the 4% regime probability. Red curve is a non-hydrostatic model, blue curve is a hydrostatic one



**Р и с. 10.** Максимальная высота наката вдоль побережья исследуемого района для шторма 4%-ной режимной обеспеченности. Красная кривая – негидростатическая модель, голубая кривая – гидростатическая модель

**F i g. 10.** Run-up maximum height along the coast of the area under study for a storm of the 4% regime probability. Red curve is a non-hydrostatic model, blue curve is a hydrostatic one

Сопоставление вариантов ГМ и НМ показало (табл. 2), что по сравнению с гидростатической негидростатическая модель дает в среднем бóльшую длину (на 37%) и бóльшую высоту (на 27%) наката.

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

**Статистические характеристики максимального наката волн вдоль побережья  
в системе шторма 4%-ной режимной обеспеченности  
(ГМ – гидростатическая модель, НМ – негидростатическая модель)  
Statistical characteristics of the maximum wave run-up along the coast in the system  
of a storm of the 4% regime probability  
(HM – hydrostatic model, NM – non-hydrostatic model)**

Значение / value	Статистические характеристики / Statistical characteristics			
	Максимальная длина наката, м / Maximum wave run-up length, m		Максимальная высота наката, м / Maximum wave run-up height, m	
	ГМ / НМ	НМ / NM	ГМ / НМ	НМ / NM
Максимум / Maximum	25,0	41,5	1,8	2,0
Минимум / Minimum	2,5	2,5	0,2	0,5
Среднее / Average	13,8	21,9	1,1	1,5
Медиана / Median	15,0	22,5	1,1	1,6
СКО / Standard deviation	2,9	5,1	0,1	0,2

Далее проводилось моделирование деформаций профиля береговой зоны для штормов разной длительности. Поскольку рельеф дна в исследуемом районе достаточно однороден во вдольбереговом направлении, использовались осредненные для трех районов поперечные профили береговой зоны (границы и номера районов показаны на рис. 8).

Штормовое волнение на мористой границе расчетной области задавалось с помощью спектра *JONSWAP*. Расчетная сетка имела шаг 2,3 м, длительность шторма составляла 12 ч.

В процессе моделирования рассчитывались ширина зоны размыва берега ( $L_C$ ) и протяженность зоны деформаций дна от уреза воды в сторону моря ( $L_S$ ). Началом отсчета при определении параметров  $L_C$  и  $L_S$  служило положение уреза воды в начальный момент времени. Внешняя граница зоны деформаций дна определялась по координате первой мористой точки, в которой деформации дна по абсолютной величине превышали 0,1 м. Расчеты проводились для двух фракций донных осадков [12]: фракция 1 – песок средней крупности ( $D_{50} = 0,375$  мм), фракция 2 – мелкий гравий и крупный песок ( $D_{50} = 0,8$  мм).

Результаты расчетов  $L_C$  и  $L_S$  для разной длительности шторма приведены в табл. 3 и 4. Видно, что наибольшие изменения указанных параметров происходят в интервале времени – 6 ч. Для фракции 2 ширина зоны размыва берега на 2,5–3,5 м меньше, чем для фракции 1. Наименьший размыв берега происходит в южной части (район 3). При длительности шторма 12 ч получены следующие оценки средних значений параметров деформации:  $L_C = 19,1 \pm \pm 2,2$  м,  $L_S = 56,0 \pm 8,9$  м.

Т а б л и ц а 3

Table 3

**Ширина зоны размыва берега  $L_C$  (м) при разной длительности шторма**  
**Width of the coast erosion zone  $L_C$  (m) at different storm durations**

Район / Region	Фракция / Fraction	Длительность шторма / Storm duration			
		3 ч / 3 hr	6 ч / 6 hr	9 ч / 9 hr	12 ч / 12 hr
1	1	4,0	14,4	18,1	20,3
	2	3,4	12,3	16,1	18,3
2	1	4,0	15,0	17,7	22,5
	2	3,4	12,8	15,3	17,0
3	1	4,2	13,6	17,5	19,8
	2	3,0	11,2	14,3	16,7

Т а б л и ц а 4

Table 4

**Протяженность зоны деформаций дна  $L_S$  (м) от уреза воды при разной длительности шторма**  
**Length of the bottom deformations zone  $L_S$  (m) from the water edge at different storm durations**

Район / Region	Фракция / Fraction	Длительность шторма / Storm duration			
		3 ч / 3 hr	6 ч / 6 hr	9 ч / 9 hr	12 ч / 12 hr
1	1	18,6	39,2	46,1	53,0
	2	16,2	32,3	39,2	43,8
2	1	22,0	49,6	56,5	63,4
	2	19,7	40,4	47,3	54,2
3	1	18,9	49,8	62,6	69,5
	2	16,6	39,6	51,1	58,0

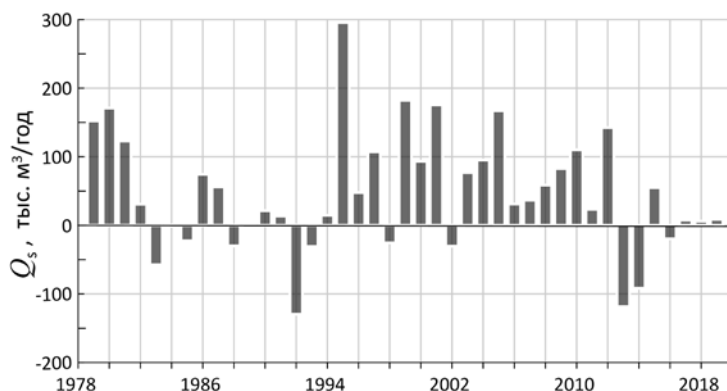
Также была проанализирована упомянутая выше состоятельность предположения о сходимости потоков наносов и балансе, близком к нулю, который был заложен в основу проектных решений. Для этих целей на основе данных ретроспективных расчетов волнения и формулы *CERC* [13] получены значения суммарного за год вдольберегового потока наносов  $Q_S$  на участке проектирования за период 1979–2019 гг.

В формуле *CERC* использовался композитный массив параметров штормового волнения, полученный по данным *SWAN-ERA* за период 1979–2019 гг. В массив включались только штормовые волны ( $h_s > 1,54$  м), направленные в сторону берега. То есть среднее направление волн  $\theta$  удовлетворяло условию  $|\theta_N - \theta| < 90^\circ$ , где  $\theta_N = 232^\circ$  – угол, соответствующий направлению внешней нормали к генеральному направлению береговой линии исследуемого района  $\theta_C = 142^\circ$ . Как показал анализ, в 80% случаев штормовые волны подходят к берегу с юго-запада ( $225^\circ$ ), а в остальные 20% – с запада-юго-запада. Наибольшее количество сильных штормов соответствует юго-западному направлению.

Как показано выше, в исследуемом районе обрушение волн начинается с глубины  $H_C = 4$  м. Поэтому в формуле *CERC* высота волн в зоне обрушения  $h_{SC}$  оценивалась выражением  $h_{SC} = \min(\gamma H_C, h_s)$ , где  $\gamma = 0,73$  – индекс обрушения.

Результаты расчета суммарных вдольбереговых потоков приведены на рис. 11. Среднегодовая величина  $Q_S$  равна 61 тыс. м<sup>3</sup>/год, при этом в 71% случаев поток наносов направлен против часовой стрелки в сторону Евпатории. Статистические характеристики  $Q_S$  следующие: максимум 391 тыс. м<sup>3</sup>/год, минимум 174 тыс. м<sup>3</sup>/год, медиана 39 тыс. м<sup>3</sup>/год, среднеквадратическое отклонение  $Q_S$  115 тыс. м<sup>3</sup>/год.

Значения потоков, наиболее близкие к среднему, отмечались в 1987, 1996, 2007, 2008, 2015 гг. В последние несколько лет (2015–2019 гг.) расчетные значения  $Q_S$  малы, т. е. в этот период положительные и отрицательные суммарные потоки наносов внутри года компенсируют друг друга.



**Р и с. 11.** Распределение суммарного вдольберегового потока наносов  $Q_s$  по годам. При  $Q_s > 0$  он направлен с юго-востока на северо-запад, при  $Q_s < 0$  – с северо-запада на юго-восток

**F i g. 11.** Distribution of the total along-coastal sediment flow  $Q_s$  by the years. At  $Q_s > 0$  it is directed from the southeast to the northwest, at  $Q_s < 0$  – from the northwest to the southeast

Следует отметить, что в связи с отсутствием данных прямых наблюдений потоков в исследуемом районе полученные выше оценки  $Q_S$  дают лишь качественную (балансовую) картину межгодовой изменчивости вдольберегового потока наносов.

На основе интегральной модели *GenCade* были получены оценки изменений береговой линии для 5 вариантов берегозащитных сооружений, включая вариант, заложенный в проект. Шаг сетки по вдольбереговой координате составлял 20 м, шаг интегрирования по времени равнялся 15 мин. Использовались два значения среднего диаметра частиц  $D_{50}$  (0,4 и 2,0 мм). На входе в модель задавался массив волновых параметров *SWAN-ERA* (высота, направление и период штормового волнения с шагом 1 ч). Моделирование проводилось на интервал времени в один год.

Расчеты выполнялись для трех лет с разными значениями суммарного вдольберегового потока наносов  $Q_s$ : для 2015 г. (поток близок к среднему многолетнему значению), для 1995 г. (явно выраженный поток в северо-западном направлении) и для 1992 г. (явно выраженный поток в юго-восточном направлении).

Установлено, что с точки зрения минимизации изменений береговой линии наиболее предпочтительным является вариант с 10 короткими бунами, при этом годовые изменения положения уреза не превышают  $\pm 20$  м. Для варианта, заложенного в проект, результаты моделирования выявили существенные изменения положения линии уреза в пределах центрального участка, в зоне расположения прерывистых волноломов, с возможным существенным сокращением ширины пляжа на участках, не прикрытых волноломами.

Эти выводы хорошо подтверждают фактические изменения в положении береговой полосы. Строительство поперечного сооружения (длина которого по нормали к берегу примерно такая же, как и проектируемых бун) привело к сокращению ширины пляжей на участке общей протяженностью  $\sim 10$  км. При этом на некоторых участках отступление берега доходило до 40 м.

### Заключение

На основании выполненных исследований можно сделать вывод, что проектное решение, в случае его реализации в полном объеме, в значительной мере может нарушить существующую природную систему формирования береговой зоны, что приведет к существенным негативным последствиям для берега на участке протяженностью до 10 км. Эти последствия могут быть выражены в сокращении ширины пляжной зоны, понижении высотных отметок пляжа, в замене на некоторых участках песчаного пляжа на галечно-гравийный. С учетом планового расположения строящейся набережной и отметки заложения основания ограждающей стены на отдельных участках возможен подмыв и повреждение стены набережной. По нашим оценкам, реализация проекта в существующем виде неминуемо приведет к необходимости проведения работ по устройству берегозащитных сооружений дополнительно еще на участке протяженностью более 10 км. Здесь уместно отметить, что указанные выводы были подтверждены на практике: даже частично построенные берегозащитные сооружения в зимний штормовой период 2021–2022 гг. оказали прогнозируемое нами негативное воздействие на береговую зону, что потребовало принятия срочных противоаварийных мер.

По результатам проведенной работы нами были даны рекомендации, суть которых заключается в исключении из состава проекта сооружений (буны длиной 125 м, прерывистые подводные волноломы), существование которых



внесет значительные изменения во вдольбереговой поток наносов и в дальнейшем приведет к деградации берега на смежных участках. На основе рекомендаций был разработан новый проект.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуйский Ю. Д. Основные закономерности морфологии и динамики западного берега Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 13. С. 62–72.
2. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь : ООО «Колорит», 2019. 256 с.
3. Дзенс-Литовский А. И. Пересыпи и лиманы Азово-Черноморского побережья и степного Крыма // Природа. 1938. № 6. С. 22–35.
4. Гуров К. И. Результаты мониторинга динамики береговой зоны и гранулометрического состава наносов пляжей в центральной части Каламитского залива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 36–46. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-36-46
5. Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1999. Vol. 104, iss. C4. P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
6. Zijlema M., Stelling G., Smit P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters // Coastal Engineering. 2011. Vol. 58, iss. 10. P. 992–1012. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>
7. XBeach Technical Reference: Kingsday Release. Model description and reference guide to functionalities / D. J. A. Roelvink [et al.]. Delft : Deltares, 2015. P. 1–141. doi:10.13140/RG.2.1.4025.6244
8. GenCade version 1 model theory and user's guide / A. E. Frey [et al.]. Vicksburg, MS : U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, 2012. P. 12–25. (Technical reports ; ERDC/CHL TR). URL: <https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p266001coll1/id/4328> (date of access: 15.01.2021).
9. Extreme wind waves in the Black Sea / B. V. Divinsky [et al.] // Oceanologia. 2020. Vol. 62, iss. 1. P. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
10. Amarouche K., Akpinar A. Increasing Trend on Storm Wave Intensity in the Western Mediterranean // Climate. 2021. Vol. 9, iss. 1. 11. <https://doi.org/10.3390/cli9010011>
11. Estimation of extreme wind wave heights / L. J. Lopatoukhin [et al.]. Geneva, Switzerland : WMO & IOC, 2000. (JCOMM Technical Report 9). 73 p. <https://doi.org/10.25607/OBP-1495>
12. Гуров К. И., Удовик В. Ф., Фомин В. В. Моделирование штормовых изменений рельефа береговой зоны и гранулометрического состава наносов в районе пересыпи оз. Богайлы (Западный Крым) // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 185–196. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-185-196
13. Леонтьев И. О., Акивис Т. М. О воздействии системы бун на песчаный берег // Океанология. 2020. Т. 60, № 3. С. 474–484. doi:10.31857/S0030157420030041

Об авторах:

**Фомин Владимир Владимирович**, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, [v.fomin@mhi-ras.ru](mailto:v.fomin@mhi-ras.ru)

**Горячкин Юрий Николаевич**, главный научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2807-201X**, **ResearcherID: I-3062-2015**, [yngor@mhi-ras.ru](mailto:yngor@mhi-ras.ru)

## Климатические потоки донных осадков в Азовском море

Б. В. Дивинский ✉, Р. Д. Косьян

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

✉ [divin@ocean.ru](mailto:divin@ocean.ru)

Поступила в редакцию 24.01.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2022;  
принята к публикации 15.03.2022

### *Аннотация*

**Цель.** Цель работы заключается в получении общей картины транспорта наносов в Азовском море за климатический отрезок времени.

**Методы и результаты.** Исследования проведены методами численного моделирования с использованием современных гидродинамической и волновой моделей, а также модели транспорта наносов, учитывающей комбинированное воздействие морских течений и ветрового волнения. Выполнены расчеты гидродинамических параметров Азовского моря за 42 года – с 1979 по 2020 г. Выходной массив данных состоит из ежечасных пространственных полей скоростей и направлений течений на пяти  $\sigma$ -горизонтах, интегральных характеристик ветрового волнения (высот, периодов, направлений распространений), уровней моря, а также потоков донного вещества. Общая длина массива позволяет детально анализировать отдельные гидродинамические ситуации, сезонные особенности, а также производить климатические обобщения. В результате проведенной работы получено качественное представление о глобальном (в масштабе моря) транспорте донных отложений в Азовском море.

**Выводы.** Климатические черты транспорта донных отложений в Азовском море: 1) основной поток формируется в виде обширного циклона, охватывающего центральную часть моря, в который вовлекаются донные осадки с западной и восточной прибрежных частей моря; 2) на северном побережье, в районе оконечности Обиточной косы, встречаются два потока: один, преобладающий, со стороны Бердянской косы, второй, менее выраженный, со стороны косы Федотова; результирующий поток образует обширные отмели к югу от Обиточной косы; 3) наиболее сильные потоки формируются у Бердянской и Обиточной кос, а также в районе косы Долгой.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, Азовское море, течения, ветровое волнение, потоки донных отложений, донные осадки

**Благодарности:** постановка задачи выполнена в рамках проекта РФФ № 20-17-00060, математическое моделирование и вычислительная часть – при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00009. Анализ результатов выполнен в соответствии с темой госзадания № 0128-2021-0013.

**Для цитирования:** Дивинский Б. В., Косьян Р. Д. Климатические потоки донных осадков в Азовском море // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 312–323. doi:10.22449/0233-7584-2022-3-312-323

## Climatic Fluxes of Bottom Sediments in the Sea of Azov

B. V. Divinsky ✉, R. D. Kosyan

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

✉ [divin@ocean.ru](mailto:divin@ocean.ru)

### *Abstract*

**Purpose.** The work is aimed at obtaining a general picture of sediment transport in the Sea of Azov over a climatic period.

© Дивинский Б. В., Косьян Р. Д., 2022

*Methods and Results.* The research was carried out by the numerical modeling methods using modern hydrodynamic and wave models, as well as the sediment transport model that takes into account the combined effects of sea currents and wind waves. The Azov Sea hydrodynamic parameters for 42 years – from 1979 to 2020 – were calculated. The output database consists of the hourly spatial fields of the currents' velocities and directions on five  $\sigma$ -horizons, integral characteristics of the wind waves (heights, periods and directions of propagation), the sea levels and the bottom matter fluxes. The total length of the array makes it possible to analyze in details the individual hydrodynamic situations and seasonal features, and also to make climatic generalizations. The carried out studies resulted in obtaining a qualitative idea of the bottom sediments global (sea-scale) transport in the Sea of Azov.

*Conclusions.* Climatic features of the bottom sediment transport in the Sea of Azov are the following: 1) the main flux is formed as an extensive cyclone that covers the central part of the sea and involves bottom sediments from the western and eastern parts of the sea coast; 2) on the northern coast, near the tip of the Obitochnaya Spit, there are two flows: the first one, predominant, is from the Berdyanskaya Spit, and the second one, less pronounced, is from the Fedotov Spit; the resulting flux forms extensive shoals to the south of the Obitochnaya Spit; 3) the strongest fluxes are formed at the Berdyanskaya and Obitochnaya spits, as well as in the area of the Dolgaya Spit.

**Keywords:** mathematical modeling, Sea of Azov, currents, wind waves, sediment flows, bottom sediments

**Acknowledgements:** the problem was stated within the framework of the Russian Science Foundation project No. 20-17-00060, mathematical modeling and computations were done with the support of the RFBR grant No. 20-05-00009. The results were analyzed in accordance with the theme of state assignment No. 0128-2021-0013.

**For citation:** Divinsky, B.V. and Kosyan, R.D., 2022. Climatic Fluxes of Bottom Sediments in the Sea of Azov. *Physical Oceanography*, 29(3), pp. 291-302. doi:10.22449/1573-160X-2022-3-291-302

## Введение

Морфологический облик любого водоема определяется его геологическими и литодинамическими особенностями (строение дна, состав и мощность донных отложений), а также комплексом внешних гидродинамических факторов, способствующих перераспределению донных осадков в пределах водной акватории и формированию береговой линии. В связи с этим особый интерес представляет построение климатических пространственных карт потоков донного вещества: такие карты отражают генеральные направления перемещения осадков. В настоящее время для Азовского моря подобные обобщающие карты (карты потоков) отсутствуют.

Отметим, что за последние несколько десятков лет усилиями многих специалистов получены интересные и важные данные о строении донных осадков, процессах седиментогенеза и осадконакопления в акватории моря (исследования<sup>1</sup> и работы [1–3]). Отдельные исследования результирующих направлений и магнитуд (т. е. величин) потоков донного материала носили выраженный региональный характер и были связаны в основном с анализом механизмов заносимостей портов и подходных морских каналов.

---

<sup>1</sup> Сорокина В. В. Особенности терригенного осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века : автореферат дис. ... канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону, 2006. 25 с. ; Ивлиева О. В. Техногенный седиментогенез в Азовском море : автореферат дис. ... д-ра геогр. наук. Ростов-на-Дону, 2007. 48 с. ; Польшин В. В. Закономерности формирования современных донных отложений Азовского моря : автореферат дис. ... канд. геогр. наук. Мурманск, 2010. 28 с. ; Экологический атлас Азовского моря / Гл. ред. Г. Г. Матишов. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. 325 с.

В целом миграция наносов представляет собой определенную проблему как в глобальных, в масштабах всего моря, задачах (обеспечение безопасности мореходства), так и в локальных (сохранение устойчивости пляжей). Приведем несколько цифр, позволяющих в какой-то мере судить о динамике наносов в бассейне Азовского моря. Администрация морских портов Украины (URL: <http://www.uspa.gov.ua>) в 2019 г. запланировала в створе навигационного канала к порту г. Бердянска работы по выемке грунта объемом в 1,4 млн м<sup>3</sup>. В порту г. Мариуполя общий объем дноуглубления, необходимый для возвращения к паспортной осадке, составляет ~ 1,5 млн м<sup>3</sup> [4]. Приведенные данные, хоть и косвенно, свидетельствуют о высокой подвижности донных отложений.

Отметим, что некоторые закономерности движения донных отложений в масштабах моря приведены в работах [5, 6], в которых указывается, что большая часть абразивного материала, образованного вследствие эрозии берегов Азовского моря, в виде взвешенных веществ транспортируется в глубоководную часть моря.

Таким образом, основная цель настоящей работы заключается в получении общей картины движения наносов в Азовском море за климатический отрезок времени с 1979 по 2020 г. Основным методом исследований – математическое моделирование.

### Материалы и методы

Азовское море является относительно небольшим водоемом, относящимся к бассейну Атлантического океана (рис. 1). Площадь поверхности ~ 39 тыс. км<sup>2</sup>. Характерные линейные размеры, составляющие условные длину и ширину, – 360 и 180 км соответственно; средняя глубина моря – 7,5 м, максимальная – 13,5 м<sup>2</sup>. Дно центральной части моря представляет собой довольно плоскую равнину, покрытую мягким илом, глубины в этой части моря 10–12 м [7]. От обрывистого северного берега в юго-западном направлении отходят несколько песчаных кос (Белосарайская, Бердянская, Обиточная, Федотова). На западе берег представляет собой сплошную песчаную косу (Арабатская Стрелка) шириной от нескольких сотен метров на юге до 6–8 км на севере. Восточный берег образован песчаным баром с несколькими развитыми косами (Ачуевская, Ясенская, Камышеватская). На севере к основной акватории примыкает вытянутый в северо-восточном направлении мелководный Таганрогский залив.

Для Азовского моря характерен смешанный тип донных отложений<sup>3</sup> с содержанием в близких пропорциях (25–40 %) фракций ила, алевролита и песка. Подобный тип осадков наиболее характерен для прибрежных участков, оснований крупных банок открытого моря, а также центров заливов.

---

<sup>2</sup> Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М. : Изд-во МГУ, 1982. 192 с.

<sup>3</sup> Экологический атлас Азовского моря / Гл. ред. Г. Г. Матишов. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. 325 с.



**Р и с. 1.** Батиметрическая карта и морфометрические особенности Азовского моря  
**Fig. 1.** Bathymetry map and morphometric features of the Sea of Azov

Основными факторами, определяющими гидродинамический режим Азовского моря, являются морские течения, поверхностное волнение, сейшевые колебания уровня, а также штормовые нагоны. В условиях относительно мелководного и незначительного по размерам моря указанные гидродинамические факторы являются в высшей степени взаимосвязанными. Например, степень развития ветрового волнения определяется устойчивостью по направлению и силе ветрового потока, длиной разгона, глубиной места. В Азовском море высоты штормового повышения уровня могут быть сопоставимы с глубинами. В 1969 г. в результате сильнейшего шторма в районе Темрюка <sup>4</sup> наблюдался почти трехметровый нагон воды, а в Геническе – двухметровый сгон, общий перекося уровня между Геническом и Темрюком составил около 5 м.

Еще одной особенностью Азовского моря является формирование ледового поля, которое, в зависимости от суровости зим, может покрывать всю акваторию моря. Это явление существенным образом трансформирует поля течений и ветрового волнения.

Таким образом, очевиден комплексный характер формирования гидродинамического режима Азовского моря.

Корректное описание механизмов взаимодействия морских течений, ветрового волнения и штормовых нагонов возможно в рамках численного моделирования. В 2021 г. авторами настоящей статьи с привлечением трехмерной гидродинамической и спектральной волновой моделей получены климатические характеристики морских течений и поверхностного волнения на Азовском море за период с 1979 по 2020 г. [8]. Основные подходы, используемые при моделировании:

<sup>4</sup> Шнюков Е. Ф., Митин Л. И., Цемко В. П. Катастрофы в Черном море. Киев : Манускрипт, 1994. 296 с.

1. Исходные поля атмосферного давления, компонентов приземного ветра и концентрации льда выбираются из базы данных глобального атмосферного реанализа *ERA5*, распространяемого Европейским центром среднесрочных прогнозов (*ECMWF*) (URL: <https://cds.climate.copernicus.eu>). Расчетная область ограничена координатами: по широте – 45,25°–47,50° с. ш., по долготе – 34,75°–39,50° в. д. Пространственное разрешение одинаково по широте и долготе и составляет 0,125°, шаг по времени – 3 ч для полей атмосферного давления и ветра, 1 сут – для концентрации льда. Основа расчетной сетки – батиметрическая карта Азовского моря, построенная специалистами Южного научного центра РАН [9].

2. В качестве гидродинамической модели выступает модель *ADCIRC* (*The ADvanced CIRCulation model*), основанная на решении уравнений мелкой воды с применением метода конечных элементов. Нами используется 5-слойный  $\sigma$ -координатный трехмерный вариант модели. *ADCIRC* позволяет контролировать процессы временного осушения (вследствие сгонов) или затопления (как результат нагонов) прилегающих прибрежных областей. Модель *ADCIRC* особенно хорошо себя зарекомендовала при исследованиях экстремальных штормовых нагонов [10]. В нашем случае выбор 5-слойной модели является определенным компромиссом между необходимостью учета основных физических механизмов генерации течений и ресурсоемкими вычислительными возможностями, что вполне оправданно, полагаем, для описания общего характера движения вод. Рассмотрение деталей вертикальной структуры течений требует несколько иного подхода и выходит за рамки настоящего исследования.

3. Параметры поверхностного волнения рассчитываются с помощью спектральной волновой модели *MIKE 21 SW* Датского гидравлического института, реализующей основные физические механизмы трансформации ветрового волнения. Вопросы адаптации модели к условиям Черного и Азовского морей детально изложены в работе [11].

4. Объединение моделей позволяет учитывать взаимодействие поверхностного волнения и течений. Определяемые в гидродинамической модели параметры течений и возвышение уровня используются в спектральной волновой модели при расчетах параметров поверхностного волнения. Радиационные напряжения, генерируемые процессами обрушения волн и рассчитываемые волновой моделью, корректируют морские течения (в основном прибрежные) и учитываются гидродинамической моделью.

Имея в распоряжении основные гидродинамические параметры, можно рассчитать потоки донного материала. Для этого воспользуемся предложенным Р. Соулсби подходом [12], учитывающим транспорт взвешенного и влекомого материала в условиях комбинированного воздействия течений и поверхностного волнения. Поток донных отложений описывается выражением

$$Q = A_s \bar{U} \left[ \left( \bar{U}^2 + \frac{0,018}{c_D} U_{rms}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \bar{U}_{cr} \right]^{2,4} (1 - 1,6 \tan \beta), \quad (1)$$

где коэффициент  $A_s = A_{sb} + A_{ss}$ ;  $A_{sb} = \frac{0,005h \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{1,2}}{[(s-1)gd_{50}]^{1,2}}$ ;  $A_{ss} = \frac{0,012d_{50}D_*^{-0,6}}{[(s-1)gd_{50}]^{1,2}}$ ;  $\bar{U}$  – скорость течения, м/с;  $U_{rms}$  – среднеквадратичная волновая орбитальная скорость, м/с;

$C_D = \left[ \frac{0,40}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right) - 1} \right]^2$  – коэффициент трения;  $\bar{U}_{cr} = 0,19(d_{50})^{0,1} \log_{10} \left( \frac{4h}{d_{90}} \right)$  – пороговое значение скорости течения, м/с;  $\beta$  – уклон дна;  $h$  – глубина, м;  $d_{50}$  и  $d_{90}$  – 50-й и 90-й процентиля распределений диаметров частиц, м;  $z_0$  – шероховатость дна, м;  $s$  – относительная плотность осадков;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\nu$  – кинематическая вязкость воды, м<sup>2</sup>/с;  $D_* = \left[ \frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} d_{50}$ . Согласно рекомендациям авторов, значение шероховатости принимается равным 0,006 м.

Таким образом, поток, задаваемый формулой (1), определяет объем частиц грунта (м<sup>3</sup>), перенесенных за единицу времени (с) через 1 м донной поверхности. Поскольку направление переноса вещества определяется в конечном итоге направлением результирующего течения, поток вещества в векторной форме представляется в виде

$$Q = (Q_x, Q_y) = \left( |Q| \frac{U_x}{|U|}, |Q| \frac{U_y}{|U|} \right), \quad (2)$$

где  $Q_x, Q_y$  – компоненты потока донных отложений;  $U = (U_x, U_y)$  – вектор скорости течения;  $U_x, U_y$  – компоненты скорости течения;  $|Q|, |U|$  – модули потока и скорости. Уточним, что преимуществом трехмерной гидродинамической модели является возможность использования именно придонных компонент скорости течения, ответственных за перемещение донного материала. Осредненные по вертикали параметры течений не учитывают, например, формирование противотечений в условиях сильных штормовых нагонов.

При моделировании используется пространственная карта донных отложений Азовского моря, опубликованная в информационной системе «Экологический атлас Азовского моря»<sup>5</sup>, а также в монографии [2]. Для области залегания грунтов, обозначенных в Атласе как «песок средне- мелкозернистый (фракция 1–0,1 мм составляет более 70 %)», а также «песок алеврито-илистый (фракция 1–0,1 мм – 50–70 %)», медианный диаметр частиц соответствует среднезернистому песку и равняется 0,35 мм; в смешанном типе осадков  $d_{50} = 0,15$  мм (т. е. полагаем, что доминирует мелкозернистый песок); в областях с преобладанием алевритов  $d_{50} = 0,075$  мм. Конечно, все это можно воспринимать как грубое приближение, но здесь сталкиваемся как с ограничениями модели (транспорт тех же илов требует несколько иного подхода), так и с качеством исходных данных. В любом случае полагаем, что дальнейшие возможные усовершенствования будут связаны скорее с уточнениями, но не с коренным пересмотром предлагаемой схемы.

Для расчетов потоков по формуле (1) требуются данные о распределении еще одного размера частиц, соответствующего 90 % функции распределения диаметров частиц ( $d_{90}$ ). К сожалению, необходимая информация о функциях распределений диаметров частиц (не говоря уже об их пространственной

<sup>5</sup> АИС «Экологический атлас Азовского моря» / Гл. ред. Г. Г. Матишов. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. 325 с. URL: <http://atlas.iaz.ssc-ras.ru/sitemap-ecoatlas.html> (дата обращения: 16.05.2022).

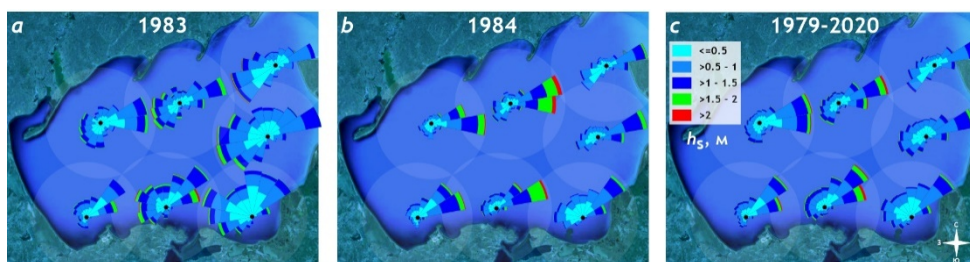
изменчивости) отсутствует. По этой причине ограничимся оценочными величинами. Следуя работе [13], в которой анализируется гранулометрический состав донных отложений Азовского моря, а также собственным исследованиям на косе Долгой, принимаем, что размер  $d_{90}$  в два – четыре раза превосходит медианный размер  $d_{50}$ . Исходя из этого, оценочно будем полагать, что  $d_{90} = 3d_{50}$ .

Необходимые расчеты произведены за 42 года – с 1979 по 2020 г. Выходной массив данных состоит из ежечасных пространственных полей скоростей и направлений течений на пяти  $\sigma$ -горизонтах, интегральных характеристик ветрового волнения (высот, периодов, направлений распространений), уровней моря, а также потоков донных осадков. Общая длина массива позволяет детально анализировать отдельные гидродинамические ситуации, сезонные особенности, а также производить климатические обобщения.

### Результаты и обсуждение

В мелководном и ограниченном по размерам Азовском море характер гидродинамического режима определяют господствующие ветры. При этом, естественно, ощутимо влияние местных условий, таких как ориентация береговой линии, батиметрические особенности, сток рек, возможное ледовое покрытие. В целом над акваторией моря преобладают северо-восточные и восточные ветры с суммарной повторяемостью до 45 % [7], что обуславливает картину среднегодовых (климатических) полей гидродинамических параметров. Тем не менее в отдельные годы наблюдается повышенная повторяемость ветров других секторов, в частности юго-западных, другими словами, подобное доминирование не является безусловным. По этой причине не лишено интереса рассмотрение не только климатических, но и некоторых среднегодовых полей.

На рис. 2 приведены розы ветрового волнения (в терминах значительных высот волн) для нескольких точек акватории Азовского моря, учитывающие только 1983 г. с увеличенной повторяемостью юго-западных ветров (рис. 2, *a*); только 1984 г. со значительным преобладанием северо-восточных ветров (рис. 2, *b*); весь период с 1979 по 2020 г. (рис. 2, *c*).



**Р и с. 2.** Розы ветрового волнения, м, за 1983 (*a*), 1984 (*b*), 1979–2020 гг. (*c*)

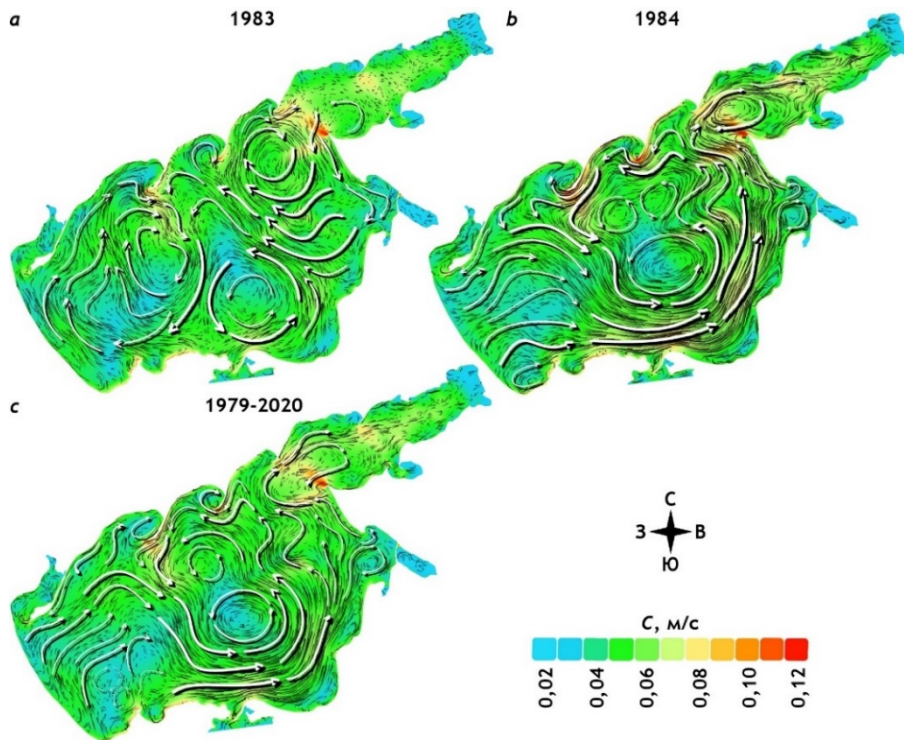
**Fig. 2.** Wind wave roses, m, for 1983 (*a*), 1984 (*b*) and 1979–2020 (*c*)

Как следует из рис. 2, в климатическом смысле почти для всей акватории моря северо-восточные направления волнения являются преобладающими.



Вклад юго-западных штормов наиболее ощутим в восточной части, что определяется в первую очередь максимальными возможными длинами разгона волн. Экстремальное волнение со значительными высотами волн, превышающими 2 м, также связано в основном, с ветрами северо-восточного направления и наблюдается в центральной части моря. Повышенная повторяемость волнения северо-восточных румбов является следствием устойчивости и продолжительности действия воздушных потоков этих направлений. Как правило, северо-восточный ветер связан с действием обширного азорского антициклона, охватывающего всю европейскую часть и определяющего ветровые условия продолжительное время.

Еще раз отметим, что особенностью Азовского моря является мелководность и относительно небольшие размеры. Следствием этого является быстрая реакция на смену атмосферных условий, а именно направления и силы преобладающего ветра, а также его пространственной изменчивости. Кроме того, значительные перекосы уровня, вызванные сгонно-нагонными явлениями, способствуют развитию циркуляции в вертикальной плоскости и могут приводить, например, к противотечениям в прибрежной зоне. Применение трехмерной гидродинамической модели позволяет анализировать важные с точки зрения динамики донных осадков придонные течения. На рис. 3 представлены карты придонных течений, осредненных за 1983 г. (рис. 3, *a*), 1984 г. (рис. 3, *b*) и за весь период с 1979 по 2020 г. (рис. 3, *c*).



**Р и с. 3.** Поля придонных течений Азовского моря, осредненных за 1983 (*a*), 1984 (*b*), 1979–2020 гг. (*c*)

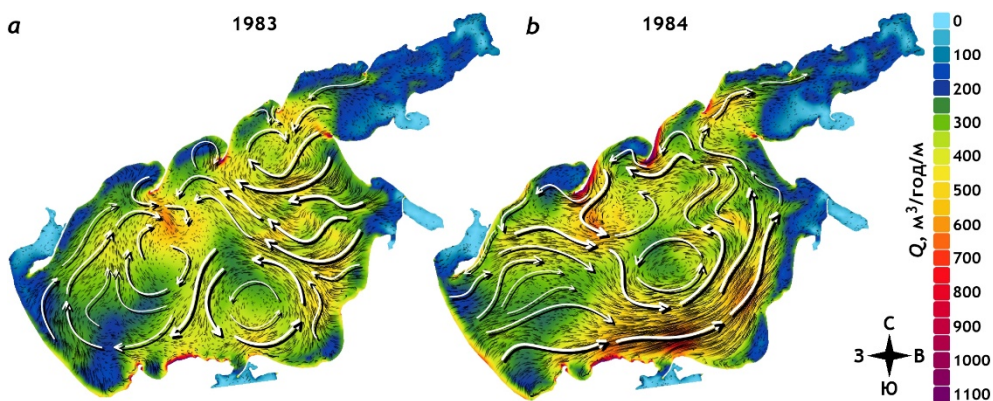
**Fig. 3.** Fields of the Azov Sea bottom currents averaged over 1983 (*a*), 1984 (*b*) and 1979–2020 (*c*)

Данные рис. 3 показывают, что доминирование ветров северо-восточного направления (рис. 3, *b*) способствует усилению придонных течений в прибрежных зонах северной, южной и восточной частей моря, другими словами, почти по всему периметру. В центральной части моря образуется обширный циклон. В западной части моря в придонном слое наблюдается отток вод от Арабатской Стрелки в сторону открытого моря, вызванный нагонными волнами. При усилении влияния юго-западных штормов (рис. 3, *a*) подобная картина придонных противотечений обнаруживается у восточного берега. Кроме того, ветры юго-западных секторов формируют антициклонический круговорот, охватывающий всю западную часть моря, и несколько ослабляют циклоническое образование в центре моря.

Выделим основные особенности климатической придонной циркуляции вод в Азовском море (рис. 3, *c*):

- в центральной части моря доминирует обширный циклонический круговорот;
- в западной части формируется слабо развитый антициклон; генеральный перенос вод направлен от Арабатской Стрелки в сторону открытого моря;
- наибольшие скорости вдольбереговых течений наблюдаются в северной части моря в районе Бердянской и Обиточной кос, а также в проливе между основной частью моря и Таганрогским заливом.

Имея в распоряжении массив необходимых параметров придонных течений и ветрового волнения, можно перейти к оценкам потоков донного материала на акватории Азовского моря. На рис. 4 приведены среднегодовые пространственные поля потоков донных отложений за 1983 (рис. 4, *a*) и 1984 гг. (рис. 4, *b*).



**Р и с. 4.** Среднегодовые потоки донного материала,  $m^3/год/м$ , за 1983 (*a*) и 1984 гг. (*b*)  
**F i g. 4.** Annual average fluxes of bottom sediments,  $m^3/year/m$ , for 1983 (*a*) and 1984 (*b*)

Как следует из рис. 4, существует одна характерная особенность глобального (в масштабах всего моря) транспорта наносов, независимая от преобладания тех или иных атмосферных условий. Речь идет о циклоническом типе движений, характерных для центральной части моря. Доминирование ветров северо-восточных или юго-западных направлений вызывает преобладающий

транспорт донных осадков в сторону открытого моря от соответственно западного (рис. 4, *b*) или восточного (рис. 4, *a*) побережий.

Климатические (как результат обобщения данных за период с 1979 по 2020 г.) потоки донного материала приведены на рис. 5.

Данные рис. 5 демонстрируют климатические черты транспорта донных отложений в Азовском море:

- основной поток формируется в виде обширного циклона, охватывающего центральную часть моря, с двумя наиболее вероятными центрами круговорота;

- в этот круговорот вовлекаются донные осадки из западной и восточной прибрежных частей моря;

- на северном побережье, в районе оконечности Обиточной косы, встречаются два потока: один, преобладающий, со стороны Бердянской косы, второй, менее выраженный, со стороны косы Федотова. Результирующий поток образует обширные отмели к югу от Обиточной косы;

- вдоль Арабатской Стрелки доминирует поперечный перенос в сторону моря, чем, вполне допустимо, и объясняется ее относительная устойчивость. Подобная картина наблюдается на протяженном участке восточного побережья, между косами Долгой и Камышеватской, а также к югу от Ачуевской косы;

- наиболее сильные потоки наносов формируются у Бердянской у Обиточной кос, а также в районе косы Долгой.

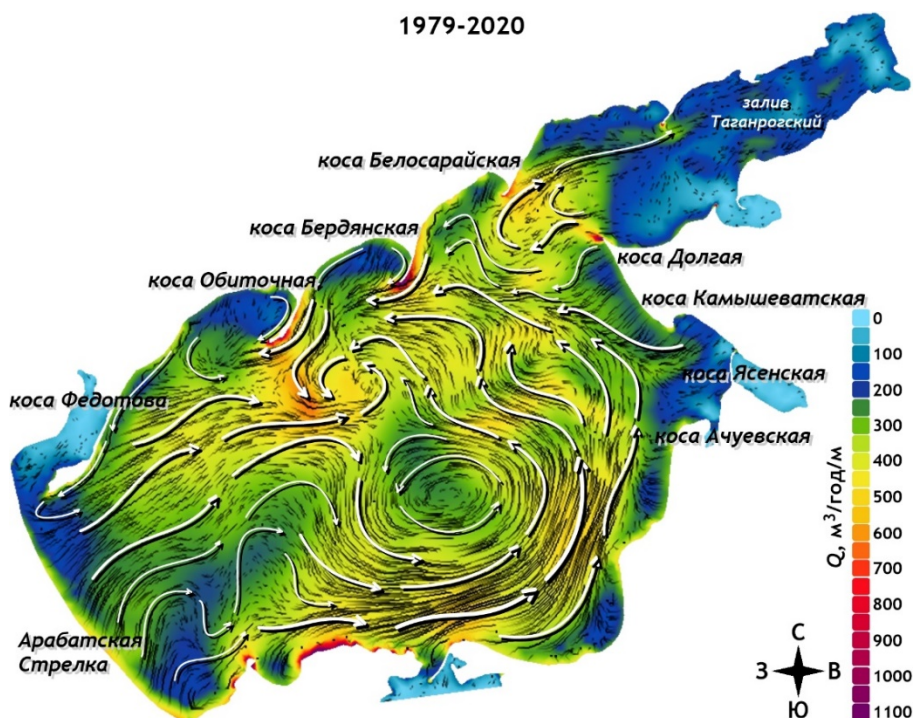


Рис. 5. Климатические потоки донных осадков ( $\text{m}^3/\text{год}/\text{м}$ )

Fig. 5. Climatic fluxes of bottom sediments ( $\text{m}^3/\text{year}/\text{m}$ )

Отметим, что при анализе результатов мы сознательно не касаемся количественных оценок величин потоков (хотя они и приведены на иллюстрациях) по нескольким причинам. Во-первых, критически важным при моделировании является корректное задание исходных данных, в нашем случае – карт донных отложений. Пески и алевриты, учитываемые в модели, для разных участков моря обладают разным процентным содержанием других пород, илов или ракушки, что неминуемо сказывается на их способности к транспортировке. Учет всех этих моментов – задача нетривиальная. Во-вторых, используемый нами подход к моделированию потоков – только один из возможных, со своими ограничениями и допущениями. Ну и наконец, последнее: любые модельные расчеты необходимо подкреплять данными наблюдений, которые в нашем случае практически отсутствуют. Конечно, можно воспользоваться косвенными критериями, например скоростью осадконакопления, но и в этом случае, учитывая точность метода, будем иметь дело разве что с порядками величин. Таким образом, мы вполне уверены в полученной нами **качественной** картине транспорта донных осадков и понимаем дискуссионность **количественных** оценок.

### Заключение

Основная цель работы заключалась в получении общей картины движения наносов в Азовском море за климатический отрезок времени. Исследования проведены методами численного моделирования с использованием современных гидродинамической и волновой моделей, а также модели транспорта наносов, учитывающей комбинированное воздействие морских течений и ветрового волнения.

Выполнены расчеты гидродинамических параметров Азовского моря за 42 года – с 1979 по 2020 г. Выходной массив данных состоит из ежечасных пространственных полей скоростей и направлений течений на пяти  $\sigma$ -горизонтах, интегральных характеристик ветрового волнения (высота, период, направление распространения), уровней моря, а также потоков донного вещества. Общая длина массива позволяет детально анализировать отдельные гидродинамические ситуации, сезонные особенности, а также производить климатические обобщения.

#### Основные результаты:

Почти для всей акватории моря северо-восточные направления волнения являются преобладающими. Экстремальное волнение со значительными высотами волн, превышающими 2 м, также связано в основном с северо-восточными секторами волнения и наблюдается в центральной части моря.

Основные особенности климатической придонной циркуляции вод:

- 1) в центральной части моря доминирует обширный циклонический круговорот;
- 2) в западной части формируется слаборазвитый антициклон;
- 3) наибольшие скорости вдольбереговых течений наблюдаются в северной части моря в районе Бердянской и Обиточной кос, а также в проливе между основной частью моря и Таганрогским заливом.

Климатические черты транспорта донных отложений в Азовском море:

- 1) основной поток формируется в виде обширного циклона, охватывающего центральную часть моря, в который вовлекаются донные осадки с западной и восточной прибрежных частей моря;

2) на северном побережье, в районе оконечности Обиточной косы, встречаются два потока: один, преобладающий, со стороны Бердянской косы, второй, менее выраженный, со стороны косы Федотова. Результирующий поток образует обширные отмели к югу от Обиточной косы;

3) наиболее сильные потоки формируются у Бердянской у Обиточной кос, а также в районе косы Долгой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матишов Г. Г.* Сейсмопрофилирование и картирование новейших отложений дна Азовского моря // Вестник Южного научного центра РАН. 2007. Т. 3, № 3. С. 32–40.
2. *Ивлиева О. В.* Особенности осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2009. 319 с.
3. Новые данные об осадконакоплении и биостратиграфии древне- и новоазовских отложений (Азовское море) / Г. Г. Матишов [и др.] // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467, № 4. С. 463–467. doi:10.7868/S0869565216100194
4. *Берлинский Н. А., Сагайдак М. А.* Оценка основных факторов заиления подходного канала порта Азовсталь (г. Мариуполь, Украина) // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Екологія». 2019. Вип. 20. Р. 87–96. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2019-20-08>
5. *Kosyan R. D., Krylenko M. V.* Modern state and dynamics of the Sea of Azov coasts // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2019. Vol. 224. P. 314–323. doi:10.1016/j.ecss.2019.05.008
6. Динамика радиационного фона в российских морях (новые данные по Азовскому морю) / Г. Г. Матишов [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493, № 2. С. 83–87. doi:10.31857/S2686739720080125
7. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 3. Азовское море. Л. : Гидрометеоздат, 1986. 218 с.
8. *Дивинский Б. В., Косьян Р. Д., Фомин В. В.* Климатические поля морских течений и ветрового волнения Азовского моря // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 501, № 1. С. 94–107. doi:10.31857/S2686739721090085
9. *Матишов Г. Г.* Геоморфологические особенности шельфа Азовского моря // Вестник Южного научного центра РАН. 2006. Т. 2, № 1. С. 44–48.
10. *Фомин В. В., Полозок А. А.* Технология моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море на неструктурированных сетках // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2013. Вып. 27. С. 139–145.
11. *Divinsky B., Kosyan R.* Parameters of wind seas and swell in the Black Sea based on numerical modeling // Oceanologia. 2018. Vol. 60, iss. 3. P. 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.11.006>
12. *Soulsby R.* Dynamics of marine sands: A manual for practical applications. London : Thomas Telford, 1997. 249 p.
13. *Баскакова Т. Е., Дмитриенко В. М.* Гранулометрический состав донных отложений Азовского моря // Труды АзНИИРХ. Ростов-на-Дону : АзНИИРХ, 2017. Т. 1. С. 9–15. URL: <https://aquadocs.org/handle/1834/16790> (дата обращения: 14.05.2022).

*Об авторах:*

**Дивинский Борис Васильевич**, ведущий научный сотрудник, лаборатория геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2452-1922**, **ResearcherID: C-7262-2014**, [divin@ocean.ru](mailto:divin@ocean.ru)

**Косьян Рубен Дереникович**, заведующий лабораторией геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), доктор географических наук, профессор, **ResearcherID: C-5154-2014**, [rkosyan@hotmail.com](mailto:rkosyan@hotmail.com)

## Влияние циклона на пространственное распределение дымового аэрозоля от пожаров в мае 2021 года

Д. В. Калининская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ kalinskaya\_d\_v@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2022; одобрена после рецензирования 18.02.2022;  
принята к публикации 15.03.2022

### Аннотация

**Цель.** Проведено комплексное исследование дальнего переноса дымового аэрозоля с использованием средств спутникового и наземного мониторинга, а также результатов моделирования динамики атмосферы.

**Методы и результаты.** Рассмотрен период множественных интенсивных пожаров, зарегистрированных в Западной Сибири вблизи границы с Казахстаном в мае 2021 г. Для оценки масштабов и расположения активных пожаров за рассматриваемый период привлекались карты спутникового мониторинга из архивов системы *FIRMS*. При анализе спутниковых изображений выявлен перенос дыма от пожаров 9 и 10 мая в сторону Среднего Урала, подтвержденный фотометрическими измерениями на станции аэрозольного мониторинга *AERONET*. Для подтверждения переноса дыма со стороны Урала представлены результаты моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков, выполненного с помощью программного комплекса *HYSPLIT*. Над территорией Волгоградской области 11 мая сформировался циклон, район Урала оказался на его периферии, что способствовало переносу дымового аэрозоля через Черноморский регион в сторону Финляндии на расстояние более 4000 км. Основная информация о стадиях формирования циклонической завихренности и переносе дымового аэрозоля была получена по данным со спутниковых платформ *MODIS Aqua*, *VIIRS* и *CALIPSO*. По спутниковым данным *VIIRS* проанализирована динамика изменчивости температуры поверхностного слоя и концентрации хлорофилла *a* в зоне максимального ветрового воздействия для Черноморского региона до и после прохождения циклона. Проанализированы также основные оптические и микрофизические характеристики атмосферного аэрозоля по данным портативного солнечного фотометра и солнечных стационарных фотометров сети *AERONET* за исследуемый период.

**Выводы.** В мае 2021 г. сложился ряд специфических метеорологических условий, которые способствовали накоплению дымового аэрозоля в атмосфере Среднего Урала и его последующему переносу сначала в Черноморский регион, а затем в сторону Финляндии.

**Ключевые слова:** *FIRMS*, *MODIS*, *VIIRS*, *SPM*, *AERONET*, *CALIPSO*, обратные траектории *HYSPLIT*, Черное море, атмосферный аэрозоль, аэрозоль, пожар, спутниковый мониторинг, наземный мониторинг, аэрозольная оптическая толщина, *MAIAC*, оптические характеристики

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, научный проект № 19-05-50023 и в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ № 0827-2021-0002, государственного задания № 0555-2021-0003 «Разработка методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных измерений». Автор благодарит Тома Кусера (Tom Kusera), Брента Холбена (Brent Holben), Джузеппе Зиборди (Giuseppe Zibordi) и группу Жене Фельдмана (Gene Feldman) из *NASA* за предоставление данных AOT, расчеты данных *BTA*, обработку результатов измерений, полученных на севастопольской станции *AERONET*, и за возможность использования качественных данных фотометрических измерений. Автор также выражает признательность С. М. Сакерину и Д. М. Кабанову за предоставление фотометра *SPM* и программное обеспечение к нему.

© Калининская Д. В., 2022

Для цитирования: Калининская Д. В. Влияние циклона на пространственное распределение дымового аэрозоля от пожаров в мае 2021 года // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 324–340. doi:10.22449/0233-7584-2022-3-324-340

## Impact of the Cyclone on Spatial Distribution of the Smoke Aerosol Resulted from the Fires in May, 2021

D. V. Kalinskaya

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

✉ *kalinskaya\_d\_v@mail.ru*

### *Abstract*

*Purpose.* Using the satellite and ground-based monitoring, as well as the results of modeling the atmosphere dynamics, a long-range transport of smoke aerosol was comprehensively studied.

*Methods and Results.* The period of multiple and intense fires recorded in Western Siberia near the Kazakhstan border in May, 2021 was considered. To analyze the scales and locations of the most active fires during the period under consideration, the satellite monitoring maps from the FIRMS system archives were used. Being analyzed, the satellite images showed the smoke transfer on May, 9 and 10 towards the Middle Urals that was confirmed by photometric measurements at the AERONET aerial ash monitoring station. The results of modeling the air mass back transfer performed due to the HYSPLIT software were represented to confirm smoke transport from the Urals. On May, 11 a cyclone was formed over the territory of the Volgograd region, its periphery just covered the Urals region. This fact contributed to the smoke aerosol transfer towards Finland at a distance exceeding 4000 km via the Black Sea region. The basic information on the stages of the cyclonic vorticity formation and the smoke aerosol transport was obtained from the MODIS Aqua, VIIRS and CALIPSO satellite platforms. Based on the VIIRS satellite data, the dynamics of the surface layer temperature variability and the chlorophyll a concentration in the zone of the maximum wind impact in the Black Sea region before and after the cyclone passage were analyzed. The main optical and microphysical characteristics of the atmosphere aerosol for the period under study were also analyzed using the data from a portable sun photometer and the AERONET stationary ones.

*Conclusions.* A number of specific meteorological conditions which developed in May, 2021 promoted accumulation of the smoke aerosol in the atmosphere of the Middle Urals and its subsequent transport, first, to the Black Sea region and then – towards Finland.

**Keywords:** FIRMS, MODIS, VIIRS, SPM, AERONET, CALIPSO, HYSPLIT back trajectories, Black Sea, atmospheric aerosol, fire, satellite monitoring, land monitoring, aerosol optical depth, MAIAC, optical characteristics

**Acknowledgments:** the work was carried out with financial support of the Russian Foundation for Basic Research, scientific project No. 19-05-50023, and within the framework of the theme of state assignment of Marine Hydrophysical Institute, RAS No. 0827-2021-0002 and state assignment No. 0555-2021-0003 “Development of methods of operational oceanology based on interdisciplinary studies of the processes of formation and evolution of marine environment, and mathematical modeling using remote and contact measurements”. The authors are thankful to Tom Kucsera, Brent Holben and Giuseppe Zibordi, and also to the group of Gene Feldman from NASA for providing the AOD data, calculating the BTA data, processing the measurement results obtained at the Sevastopol AERONET station, and for the possibility of using high-quality photometric measurement data. The author is also grateful to S. M. Sakerin and D. M. Kabanov for providing the SPM photometer and its software.

**For citation:** Kalinskaya, D.V., 2022. Impact of the Cyclone on Spatial Distribution of the Smoke Aerosol Resulted from the Fires in May, 2021. *Physical Oceanography*, 29(3), pp. 303-319. doi:10.22449/1573-160X-2022-3-303-319

## Введение

Точную оценку радиационного воздействия аэрозолей на климатическую систему осложняет недостаток информации об их временной и пространственной изменчивости, а также оптических и микрофизических свойствах [1, 2]. Для понимания динамики распределения аэрозолей необходимо исследовать влияние аэрозолей различных типов на глобальные и региональные изменения климата. Одним из преимуществ дистанционного метода исследования является его обширное покрытие по пространству. При этом неоднородности атмосферы (облачность, стратификация, изменчивость атмосферного давления и температурная инверсия) могут оказывать существенное влияние на качество полученных спутниковых данных и впоследствии на результаты их анализа <sup>1</sup>.

Наземные измерения позволяют скорректировать те неточности в определении полученных дистанционными методами оптических характеристик, которые были вызваны изменчивостью и аномалиями этих характеристик. Однако локальные измерения на отдельной станции не дают возможности полностью описать распределение аэрозолей над акваторией или наземным регионом из-за значительной пространственной и временной неоднородности аэрозольных частиц в атмосфере. Таким образом, сопоставление данных спутниковых и наземных наблюдений позволяет восстановить более полную картину распределения оптических характеристик атмосферы и оценить как локальные, так и глобальные случаи аэрозольного воздействия на климат (см. работу <sup>2</sup> и статьи [2, 3]).

Главными задачами космического мониторинга пожаров являются оперативное определение очагов возгорания и оценка площадей, пострадавших от пожаров. Для решения этих задач данные дистанционного зондирования *MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro Radiometer)* со спутников *Aqua* и *Terra* [4] используются в качестве базовых, а данные натуральных измерений оптических параметров атмосферы подстилающей поверхности – с целью уточнения.

## Приборы и материалы

Аэрозольная оптическая толщина (АОТ) атмосферы вычисляется согласно закону Бугера по спектральному ослаблению прямого солнечного излучения. Для определения АОТ рассчитывается ослабление света вследствие молекулярного рассеяния Рэля и поглощения газообразными составляющими атмосферы, которое затем вычитается из общей оптической толщины атмосферы. Измерения фотометров используются для расчета АОТ на длинах волн  $\lambda$  за исключением канала 936 нм, по измерениям на котором определяют содержание паров воды в столбе атмосферы [5, 6]. АОТ является индикатором изменчивости оптических свойств атмосферы из-за корреляции между концентраци-

---

<sup>1</sup> Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии : Физика атмосферы. Л. : Гидрометеоздат, 1984. 752 с.

<sup>2</sup> Ивлев Л. С. Влияние атмосферных аэрозолей на глобальный и региональный климат Земли // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем : сборник докладов. Санкт-Петербург : ГУАП, 2015. С. 117–119.



ями аэрозольных частиц и коэффициентами ослабления света, данные о которых получают благодаря широкому использованию методов спутникового дистанционного зондирования [2].

В работе использованы три типа данных об АОТ атмосферы: данные измерений, полученные со спутников *Terra* и *Aqua* спектрорадиометром *MODIS* [4], результаты наземных наблюдений, измеренные портативным фотометром *SPM* [7] для станции Севастополь, и данные фотометров со станций международной сети аэрозольного мониторинга *AERONET* [8, 9].

Благодаря спутниковому продукту *MODIS Aerosol Optical Depth (AOD)* уровня *L2* можно получить точное синоптическое представление об уровне загрузки аэрозоля в атмосфере. Аэрозоли поглощают и рассеивают падающий солнечный свет, что снижает видимость и увеличивает АОТ. Аэрозоли также влияют на погоду и климат, способствуя охлаждению или нагреву Земли, помогая образованию облаков или предотвращая его [10]. Спутниковые данные уровня *L3* представляют собой количественную информацию. Эти данные используются при прогнозировании воздействия аэрозолей в различных моделях.

Оценки АОТ, полученные с помощью алгоритма *MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction)*, характеризуют величину аэрозольного поглощения и рассеяния во всем столбе атмосферы<sup>3</sup>. С целью определения пространственно-временных особенностей АОТ для Черноморского региона были применены именно данные, рассчитанные с применением спутникового алгоритма *MAIAC*, так как они имеют высокое пространственное разрешение и доступны за период измерений радиометра *MODIS*. Сравнительный анализ этих данных и данных черноморских станций сети *AERONET* показал, что данные, полученные с помощью алгоритма *MAIAC*, имеют меньшие, по сравнению с другими аэрозольными продуктами *MODIS*, расхождения с данными наземных измерений. В настоящее время *MAIAC* является единственным алгоритмом, который позволяет получить высококачественную информацию об аэрозолях с пространственным разрешением 1 км, включая мелкомасштабные городские загрязнения, дым от активных пожаров (в том числе и небольших локальных пожаров) и пыльные бури. Продукты *MAIAC* позволяют фиксировать и точно типизировать аэрозоли при большинстве активных пожаров, которые часто распознаются как облака в стандартных рабочих алгоритмах атмосферной коррекции. Благодаря хорошей точности на всех типах подстилающей поверхности, включая яркие снежные и городские поверхности, продукт *MAIAC «AOD»* широко используется для контроля качества воздуха во всем мире. *MAIAC* предоставляет данные в условиях частичной облачности<sup>3</sup>, когда стандартные продукты с грубым разрешением не могут обеспечивать достоверной информацией об оптических характеристиках атмосферного слоя<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> *Lyapustin A., Wang Y.* MAIAC: Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS : Algorithm Theoretical Basis Document (ver. 1.0). URL: [https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/mis-sions-and-measurements/modis/MAIAC\\_ATBD\\_v1.pdf](https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/mis-sions-and-measurements/modis/MAIAC_ATBD_v1.pdf) (date of access: 23.05.2022).

<sup>4</sup> *Краснощёков К. В., Якубайлик О. Э.* Оценка качества атмосферного воздуха по спутниковым данным // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы VII Международной научной конференции. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2020. С. 236–239.

АОТ по данным *MODIS* и *MAIAC* – результат комбинации измерений спутников *Terra* и *Aqua*, информация о котором предоставляется в близком к реальному времени. При этом разрешение сенсора *MODIS* – 0,5°, разрешение снимков – 2 км, временное разрешение – суточное, а у продуктов *MAIAC* разрешение сенсора – 1 км, разрешение снимков – 1 км, временное разрешение – суточное<sup>4</sup>.

Чтобы сопоставить спутниковые и наземные измерения для корректировки неточностей, вызванных изменчивостью и аномалиями атмосферных параметров, были отобраны данные международной сети фотометров *AERONET*, находящиеся в свободном доступе на сайте <http://aeronet.gsfc.nasa.gov> [11].

Для Черноморского региона наземный мониторинг осуществлялся с использованием солнечного фотометра *SPM* – портативного прибора для измерений спектральной прозрачности атмосферы. Определение искомым характеристик атмосферы основывается на методе спектральной прозрачности – фотометрировании прямого солнечного излучения, прошедшего через атмосферу<sup>5</sup>, и дифференциальной методике [7, 12, 13].

Для определения местоположения и масштабов очагов возгорания использовались карты спутникового мониторинга активных пожаров, полученные из архивов системы *FIRMS* (URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>).

Для определения преимущественного типа аэрозоля за исследуемый период были проанализированы спутниковые данные *CALIPSO* – американо-французского исследовательского спутника, запущенного в рамках программы *NASA EOS (Earth Observing System)*, предназначенного для изучения облачного покрова Земли и вертикальной структуры атмосферного аэрозоля. Основным измерительным инструментом *CALIPSO* является трехканальный изображающий радиометр (8,65; 10,6 и 12,05 мкм). По измерениям *CALIPSO* можно восстанавливать вертикальную структуру атмосферы, а также определять преимущественный тип аэрозоля над исследуемым регионом.

Типы аэрозолей определяют по величине интегрированного коэффициента обратного рассеяния и коэффициента деполяризации частиц. Типы аэрозолей, определяемые по алгоритмам *CALIPSO*: дым (от горящей биомассы), пыль, загрязненная пыль (смеси пыли и дыма), загрязненный континентальный и чистый континентальный аэрозоль [14, 15]. Каждый тип аэрозоля характеризуется набором лидарных отношений на длинах волн 532 и 1064 нм. Лидарные отношения рассчитываются по типичным распределениям размеров частиц и комплексных показателей преломления [16–17].

Для получения информации об источнике дымового аэрозоля использовались результаты расчета обратных траекторий переноса воздушных масс, полученные с помощью программного комплекса модели *HYSPLIT*. Анализ обратных траекторий позволяет отследить перемещение воздушных потоков на разных высотах и установить местоположение вероятных источников поступления примесей в атмосферу [16–18].

---

<sup>5</sup> *Васильев М. С.* Исследования атмосферного аэрозоля и водяного пара в Якутии методами спектральной солнечной фотометрии // Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри, с международным участием. Нерюнгри : Изд-во Технического института (ф) СВФУ, 2018. С. 225–228.

## Результаты

Дым от крупных лесных пожаров оказывает сильное влияние на радиационные характеристики атмосферы и является важной компонентой оптической погоды в ряде регионов. Пожары можно рассматривать как случайные эпизодические явления, но для бореальной климатической зоны в теплый период они являются типичными ситуациями [19].

В конце апреля и начале мая 2021 г. были зафиксированы множественные очаги возгорания на юге Среднего Урала и Западной Сибири. Площадь территории, охваченной этими пожарами, превысила 500 км<sup>2</sup>. По информации Уральского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, во многих районах на юге Свердловской области уровень пожарной опасности достиг чрезвычайного 5-го класса. Для этих областей такие масштабные пожары в мае – достаточно редкое явление (последний раз подобное наблюдалось в 2004 г. в Курганской области, однако тогда дым распространялся в другом направлении).

9 мая над территорией Урала сформировались благоприятные условия для развития первой стадии циклона: холодный воздух с севера начал перемещаться на юг в сторону теплого воздуха, образуя участок холодного фронта. Одновременно с юга теплый воздух начал перемещаться в сторону холодного, образуя теплый участок фронта. В результате слияния арктического и азиатского антициклонов 11 мая над территорией южного Урала сформировался крупный антициклон, а над территорией Волгоградской области – циклон с давлением в центре (49,474° с. ш., 45,773° в. д.) 1004 гПа, диаметром 1200 км на высоте 5 км (оценки проведены по данным сайта <https://www.ventusky.com>). По информации ГИС-центра ПГНИУ (URL: <http://accident.perm.ru>), 10 мая установился восточный ветер в нижней части тропосферы и продукты горения от пожаров начали распространяться в сторону Урала и далее по западной периферии антициклона вдоль Уральского хребта на север.

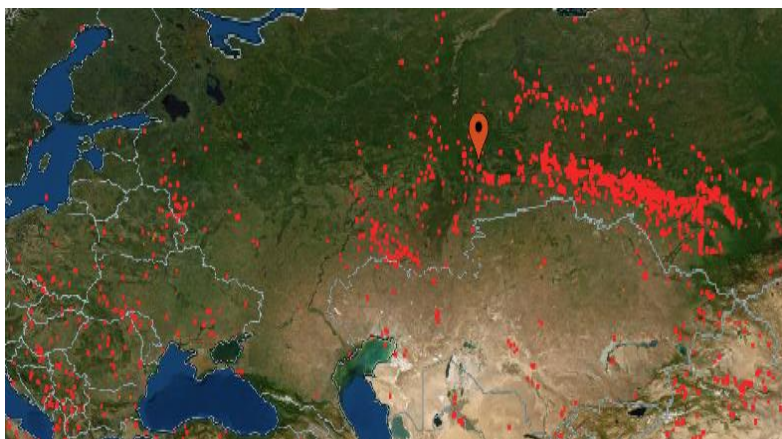
За сутки циклон со скоростью 20 км/ч переместился в направлении Ростовской области, где была зарегистрирована его максимальная интенсивность: на высоте 1 км максимальные орбитальные скорости достигали 100 км/ч, а на высоте 100 м орбитальные скорости не превышали 50 км/ч. По спутниковым данным за 11 мая были оценены размеры циклона: его диаметр составил около 2500 км на высоте 5 км, а зона пространственного воздействия распределения дымового аэрозоля (оцененная по данным за 13 мая) составила около 4000 км (рис. 1, а).

Для оценки степени воздействия циклона на пространственное распределение дыма от пожаров на Урале были проанализированы данные об оптических характеристиках атмосферного аэрозоля на станциях *AERONET* – сначала непосредственно вблизи пожаров до появления циклона (начиная с 9 мая), а затем на других станциях по ходу перемещения циклона за все дни, когда на спутниковых снимках наблюдалась дымка от пожаров (рис. 1, а).

10 мая регистрировались задымление и запах гари в Екатеринбурге, которые были обусловлены устойчивой атмосферой и слабым ветром, не способствовавшими перемешиванию приземного слоя атмосферы и ее очищению.



*a*



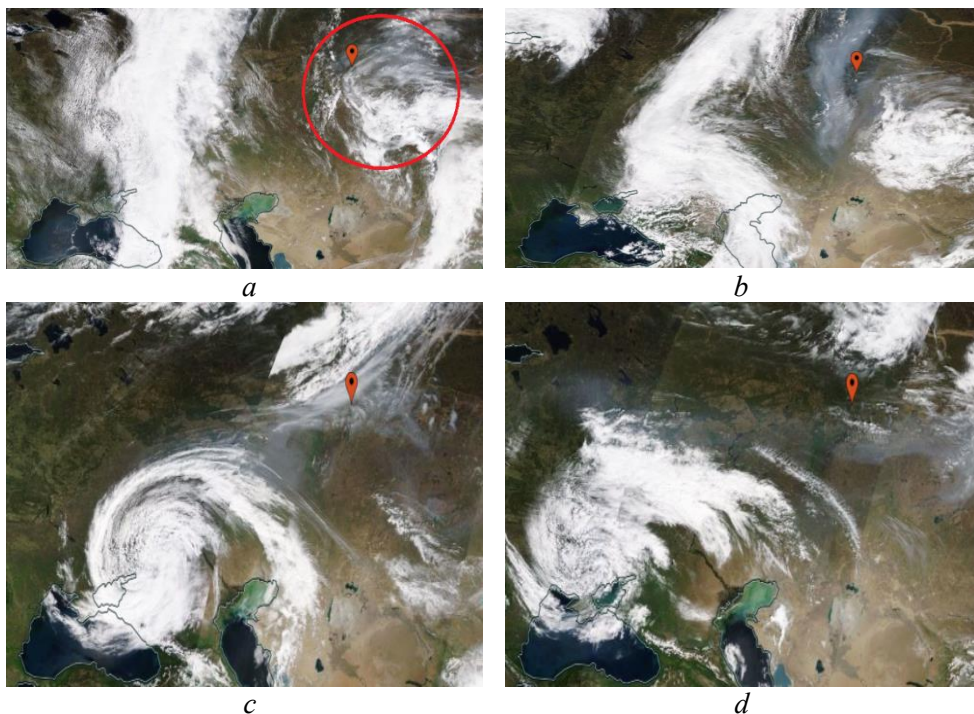
*b*

**Рис. 1.** Полученное посредством спектрорадиометра *MODIS* спутниковое изображение в естественных цветах (*TrueColor*) дошедшего до территории Финляндии дымового шлейфа за 13 мая 2021 г. (*a*); области интенсивных пожаров по данным системы *FIRMS* за 9 мая 2021 г. (*b*) (URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

**Fig. 1.** *MODIS* spectroradiometer-derived satellite image (for May 13, 2021) of a smoke plume in natural colors (*TrueColor*) that reached the territory of Finland (*a*); areas of intense fires according to the *FIRMS* system for May 9, 2021 (*b*) (URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

Ближайшей к зоне возгорания, по данным системы *FIRMS*, была станция *AERONET Yekaterinburg* ( $57,03833^{\circ}$  с. ш.,  $59,54500^{\circ}$  в. д.), которая отмечена маркером на рис. 1, *b*. Как видно из карт, других таких же интенсивных и масштабных областей возгорания нет. Данные об АОТ и распределении частиц по размерам подтвердили наличие большого количества мелкодисперсных аэрозольных частиц дыма в атмосфере над рассматриваемым регионом. Так, например, за 10 мая на станции *Yekaterinburg* среднее значение АОТ на длине волны 500 нм (АОТ (500)) равно 1,04, а максимальное значение за этот

день АОТ (500) составляет 3,2 (уровень данных обработки *AERONET level 1,5*). На рис. 2 маркер отмечает расположение станции *Yekaterinburg*, а кругом на рис. 2, *a* выделен регион, оказавшийся под воздействием дыма от пожаров. Как видно из рис. 2, *a*, дым от пожаров 9 мая покрывает территорию Свердловской области равномерно, однако 10 мая на границе раздела холодного континентального арктического воздуха и теплого континентального тропического воздуха образуется фронт окклюзии, содержащий область повышенной концентрации дымового аэрозоля, т. е. область стагнации, которая отличается от другой облачности по плотности и структуре (рис. 2, *b*).



**Р и с. 2.** Спутниковые цветосинтезированные изображения в естественных цветах (*TrueColor*), полученные посредством спектрорадиометра *MODIS* за 9 (*a*); 10 (*b*); 11 (*c*); 12 мая (*d*) 2021 г. (URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

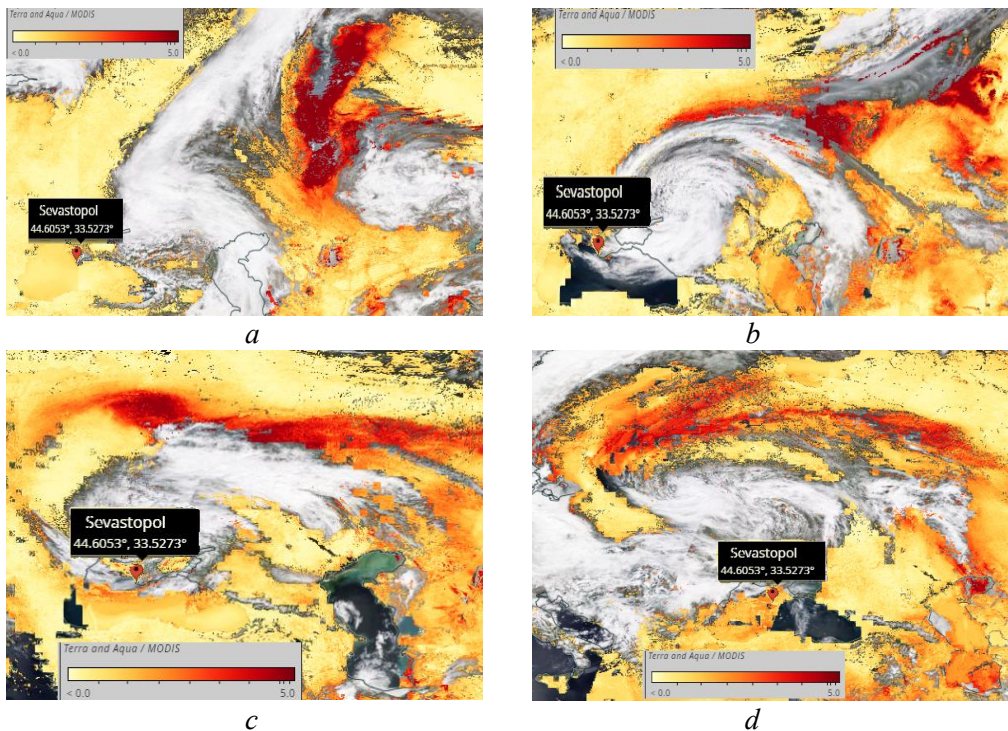
**F i g. 2.** Satellite color-synthesized images in natural colors (*TrueColor*) obtained using the *MODIS* spectroradiometer for May, 9 (*a*), May, 10 (*b*), May, 11 (*c*) and 12 (*d*), 2021 (URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

По данным *AERONET*, во время циклона преобладают мелкодисперсные частицы и наблюдаются низкие значения АОТ, что обусловлено выпадением в осадок основной части аэрозоля под воздействием силы тяжести и силы инерции. На любые частицы, взвешенные в потоке внутри циклона, действует, помимо центробежной силы, сила Кориолиса, которая стремится сместить их с криволинейных линий тока по касательным, направленным под некоторым углом вниз и к периферии.

Именно этот факт объясняет значения АОТ, полученные на станции *AERONET Kyiv* (50,364° с. ш., 30,497° в. д.) и Севастополь (44,616° с. ш., 33,517° в. д.) до и после прохождения циклона. На станции Севастополь значения аэрозольной оптической толщины, полученные посредством фотометра

SPM, следующие: за 10 мая АОТ (500) = 0,09; за 12 мая АОТ (500) = 0,1; за 13 мая среднедневная АОТ (500) = 0,08, минимальная за весь период с 9 по 13 мая АОТ (500) = 0,03. Такие низкие значения объясняются тем, что с 11 по 13 мая над Севастополем периодически шли дожди. Значения АОТ для станции *Kyiv* на длине волны 500 нм отсутствуют за 9–31 мая, поэтому анализ оптических характеристик аэрозоля для данной станции был сделан по данным, полученным на длине волны 675 нм (АОТ (675)). 12 мая значения АОТ очень низкие (АОТ (675) = 0,024), так как третья стадия развития циклона (максимальное развитие) к этому дню уже прошла и почти весь аэрозоль был вымыт из атмосферы осадками. За 13 мая на станции *Kyiv* АОТ (675) = 0,416, что выше среднемесячных значений за май 2021 г. (АОТ (675) = 0,165) в 2,5 раза, так как дымовой аэрозоль в этот день также наблюдался над станцией.

После прохождения циклона воздействие дыма могло наблюдаться также на российских станциях *AERONET Moscow\_MSU\_MO* (55,707° с. ш., 37,522° в. д.), *Zvenigorod* (55,695° с. ш., 36,775° в. д.) и станции *Minsk* (53,920° с. ш., 27,601° в. д.), расположенной в Белоруссии. Однако до и во время циклона, что видно на спутниковых изображениях, станция *Minsk* находилась на удалении от дымового шлейфа, а 12, 13 и 14 мая на всех трех станциях была зарегистрирована облачность, поэтому данные об оптических характеристиках атмосферного аэрозоля отсутствуют.



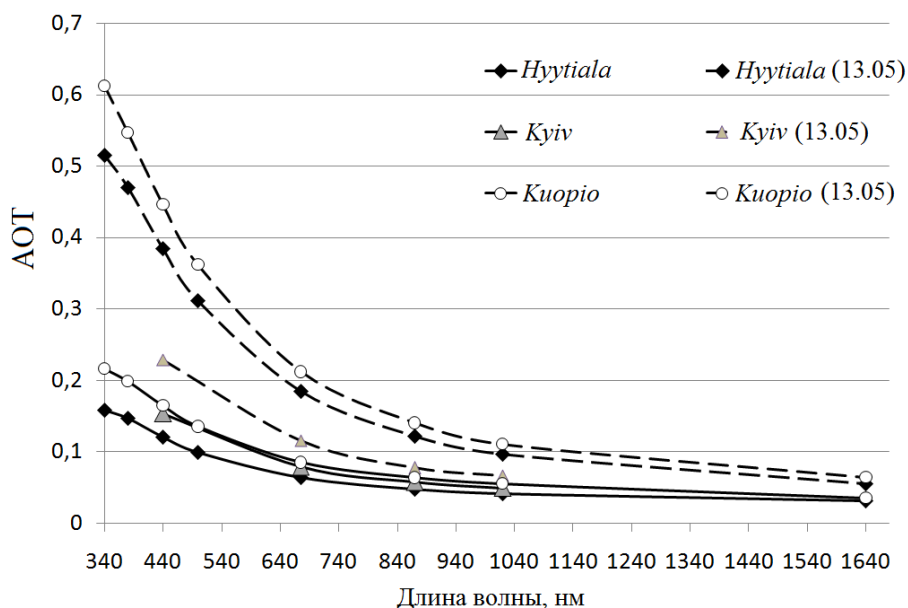
**Р и с. 3.** Распределение АОТ по данным *MODIS* за 10 (a), 11 (b), 12 (c), 13 мая (d) 2021 г. (URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

**Fig. 3.** Distribution of aerosol optical thickness according to the *MODIS* data for May, 10 (a), 11 (b), 12 (c), 13 (d), 2021 (URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

Динамика изменчивости значений АОТ, полученных с помощью фотометров *AERONET* и по спутниковым данным *MODIS*, сходна (рис. 3). Однако данные об изменчивости АОТ, полученные дистанционными методами, превышают натурные значения в несколько раз, что подтверждается в предыдущих исследованиях [20, 21]. Отражательная способность воды и суши сильно различается, что обуславливает сложности при определении оптических характеристик с использованием одних и тех же алгоритмов и методов для различных типов подстилающей поверхности. Это приводит к тому, что неточность в оценке отражательной способности на величину 0,01 может привести к неточности оценки АОТ на величину 0,1 [22].

Как видно из рис. 3, облако дыма 10 мая содержит большую концентрацию аэрозольных частиц, которые в результате образовавшегося циклона частично заглубляются, при этом большая их часть распространяется по периферии (11 и 12 мая), а затем воздушными потоками они разносятся вплоть до Финского залива (13 мая) (рис. 1, а).

На рис. 4 показан вклад крупнодисперсной и мелкодисперсной фракций в общее распределение АОТ на длине волны 500 нм для трех станций. Как видно из рисунка, во время регистрации переноса дымового аэрозоля (на станции *Yekaterinburg* 10 мая 2021 г. и на станциях *Kuopio* и *Hyytiala* 13 мая 2021 г.) заметен рост значений АОТ, причем именно за счет мелкодисперсной фракции.

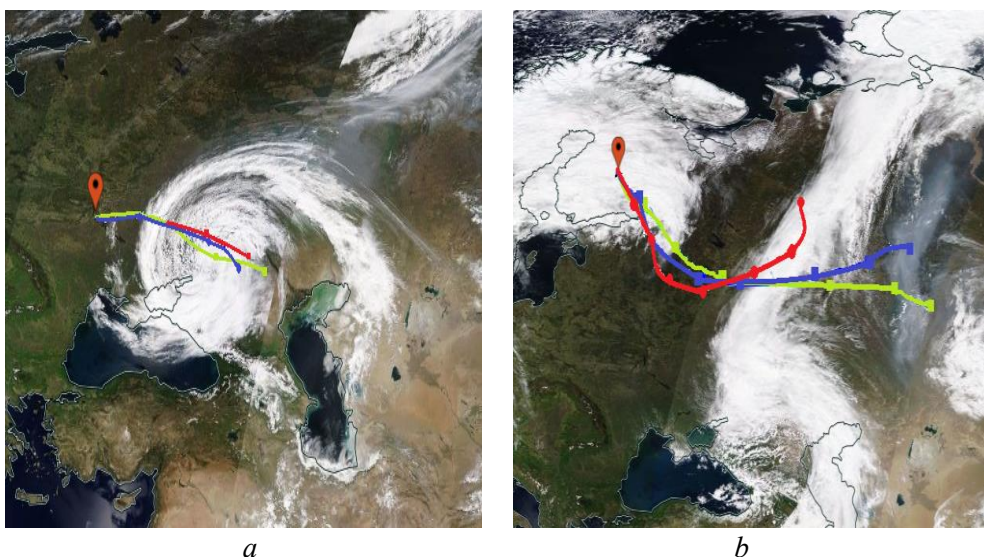


**Рис. 4.** Спектральная изменчивость АОТ для станций *AERONET* *Hyytiala*, *Kyiv* и *Kuopio*  
**Fig. 4.** Spectral variability of AOT for the AERONET stations *Hyytiala*, *Kyiv* and *Kuopio*

По данным работы [19], для двух выделенных подмассивов данных «дым/фон» наиболее существенные изменения АОТ при дымах происходят в видимом диапазоне спектра за счет высоких значений мелкодисперсной компоненты. Например, в области 500 нм средние и модальные значения АОТ (500) увеличиваются в ~ 2,7 раза, а вклад мелкодисперсной моды – в три

раза. Грубодисперсная компонента в условиях дымов тоже возрастает – в среднем в 1,5 раза. Анализ данных, полученных для станций *Huutiala*, *Kuopio* и *Kyiv*, за дни регистрации дыма также показал увеличение мелкодисперсной моды в 1,5–3 раза (рис. 4).

Для подтверждения масштабов распространения дымового аэрозоля был проведен анализ данных модели *HYSPLIT*, предоставляющей обратные траектории перемещения воздушных потоков в направлении станций *AERONET* соответственно для каждого дня переноса (рис. 5). На рис. 5 показан результат моделирования обратных траекторий на высотах 250, 500 и 1500 м для станций: 1) *Kyiv* за 13 мая, где виден юго-восточный перенос на всех высотах через область, над которой господствовал циклон 11 мая (рис. 5, *a*); 2) *Kuopio*, где наблюдается восточный перенос со стороны Урала (результат моделирования за пять дней до дня регистрации дыма над Финляндией) (рис. 5, *b*).



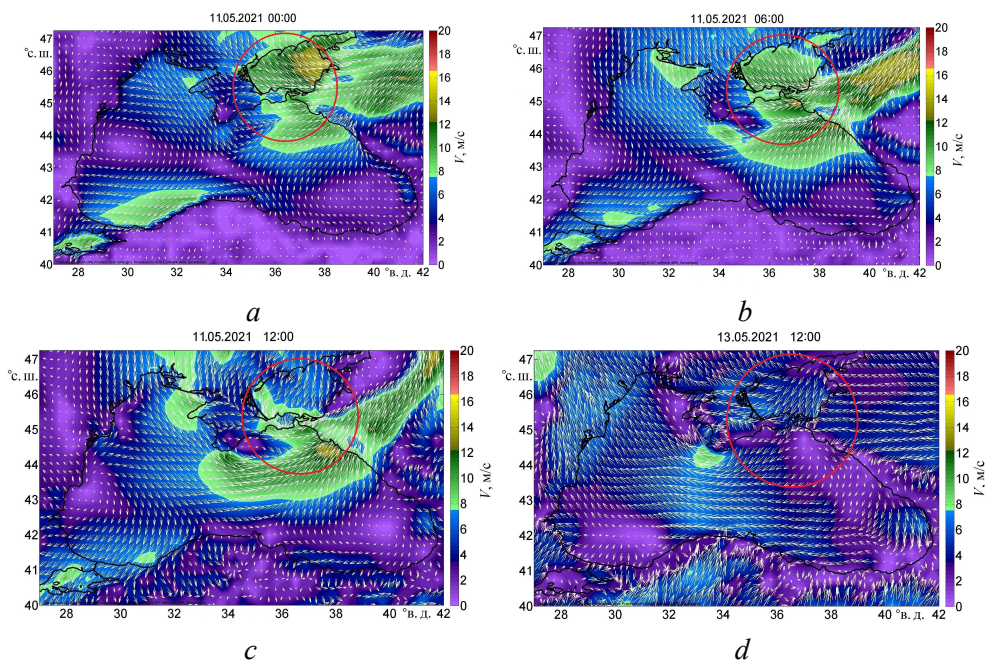
**Р и с. 5.** Обратные траектории переноса воздушных потоков по результатам моделирования *HYSPLIT* за 13 мая 2021 г. для станций *AERONET* *Kyiv* (*a*), *Kuopio* (*b*)

**F i g. 5.** Back trajectories of the air mass transfer based on the results of the *HYSPLIT* modeling for May 13, 2021 for the *AERONET* stations *Kyiv* (*a*) and *Kuopio* (*b*)

Возникновение и развитие циклона совпадает с началом интенсивного прогрева поверхностного слоя, который мог повлиять на изменчивость гидрофизических характеристик вод Черного моря. Для оценки масштабов воздействия циклона были проанализированы приземные скорости ветра до и во время прохождения циклона, а также пространственное распределение полей температуры и концентрации хлорофилла *a* для Черноморского региона.

В ночь с 10 на 11 мая максимальное ветровое воздействие (область которого выделена красным кругом на рис. 6) наблюдается в восточной части Азовского моря (скорость ветра  $V$  достигала 14 м/с), в восточной акватории Черного моря скорость ветра доходила до 8 м/с (рис. 6, *a*).





**Рис. 6.** Пространственное распределение направлений и скоростей приземного ветра над Черноморским регионом 11 мая в 00:00 (*a*), в 6:00 (*b*), в 12:00 (*c*); 13 мая в 12:00 (*d*)

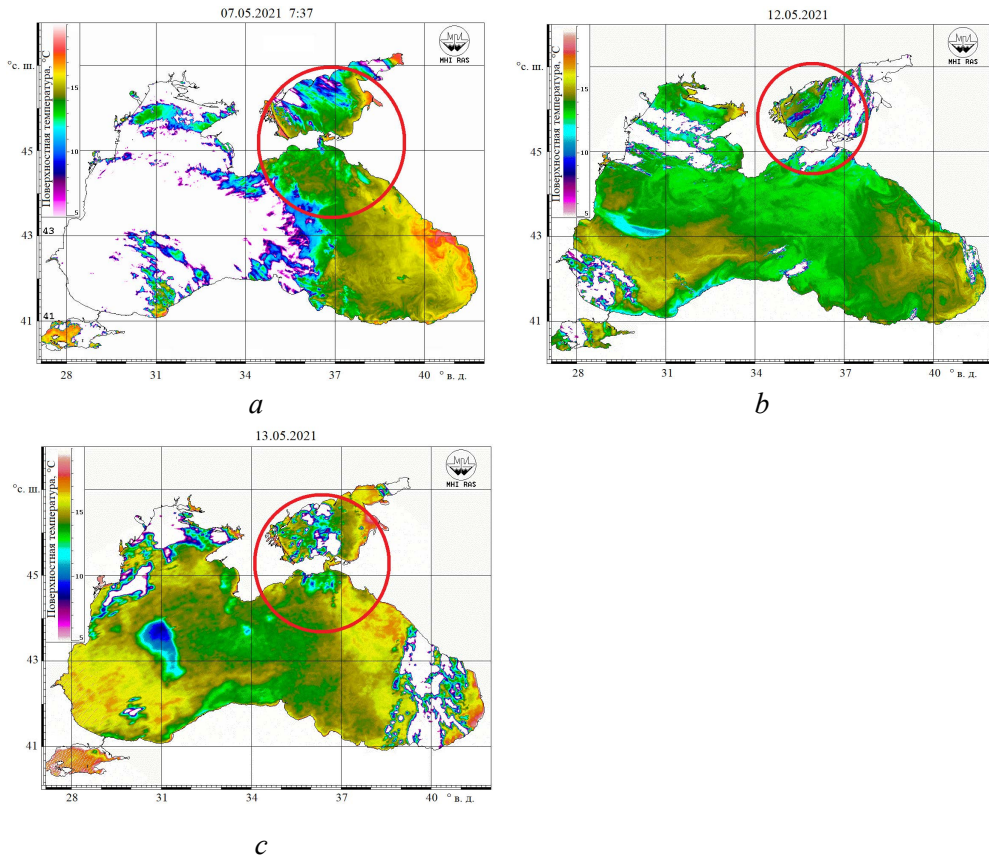
**Fig. 6.** Spatial distribution of the surface wind directions and velocities over the Black Sea region on May 11, 00:00 (*a*); May 11, 6:00 (*b*); May 11, 12:00 (*c*) and May 13, 12:00 (*d*)

11 мая в 6:00 вблизи Керченского пролива наблюдаются локальные максимумы скорости ветра ( $V \approx 15$  м/с), которые в течение дня смещаются на юг (рис. 6, *b*, *c*). К концу дня ветровое воздействие циклона минимизируется, а к полудню 13 мая в восточной части Черного моря наблюдается штиль (рис. 6, *d*). Изменчивость интенсивности и направления ветра во время прохождения циклона и после него повлияла на пространственное распределение полей температуры, особенно в зоне максимальных скоростей.

Как видно из рис. 7, *a*, еще до прохождения циклона (7 мая) в восточной части Черного моря наблюдался прогрев вод, характерный для начала мая ( $t_{cp} = 15$  °С).

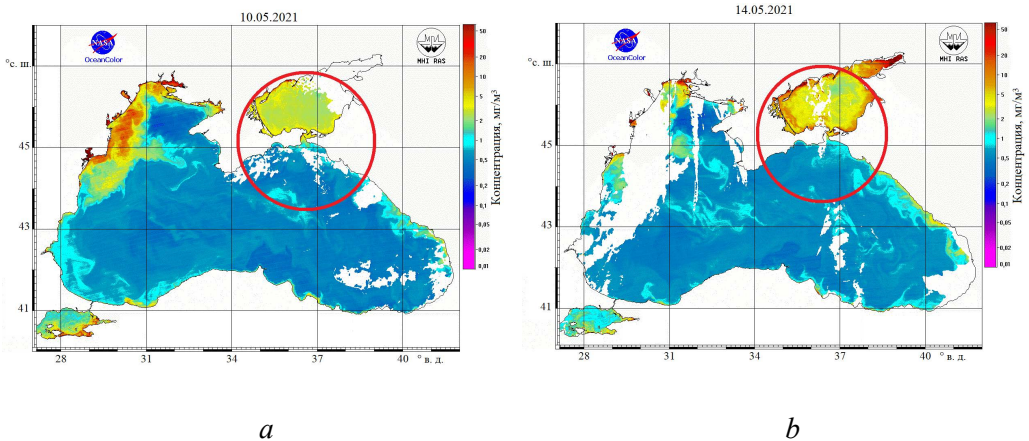
После прохождения циклона (12 мая) наблюдается понижение температуры в северо-восточной области на 2–3 °С (рис. 7, *b*), однако с 13 мая вновь возобновляется дневной прогрев поверхностных вод (рис. 7, *c*).

Оценка пространственной изменчивости концентрации хлорофилла *a* в зоне максимального ветрового воздействия для Черноморского региона показала минимальные различия значений концентрации до и после прохождения циклона (рис. 8).



**Р и с. 7.** Пространственное распределение полей температуры для акватории Черного моря 7 (a), 12 (b) и 13 мая (c) по спутниковым данным VIIRS

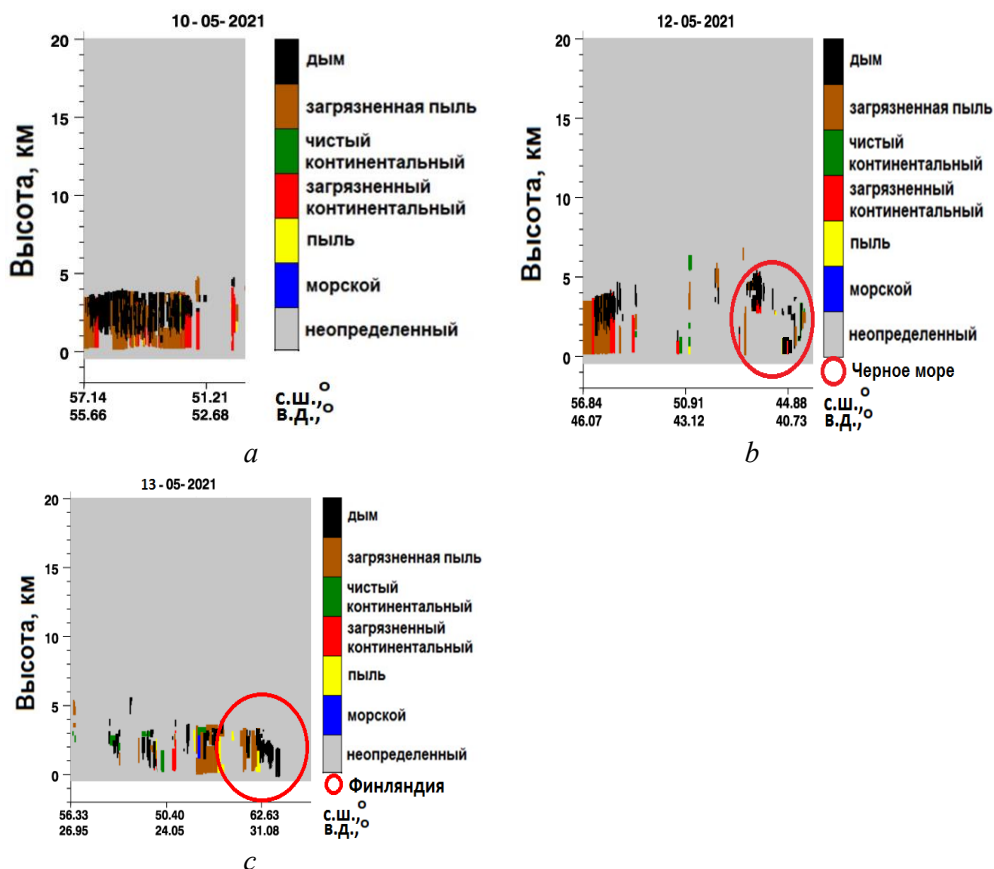
**Fig. 7.** Spatial distribution of surface temperature for the Black Sea region on May, 7 (a); May, 12 (b) and May, 13 (c) based on the VIIRS satellite data



**Р и с. 8.** Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* над Черноморским регионом 10 (a) и 14 мая (b) по спутниковым данным VIIRS

**Fig. 8.** Spatial distribution of the chlorophyll *a* concentration over the Black Sea region on May, 10 (a); May, 14 (b) based on the VIIRS satellite data

Анализ спутниковых данных *CALIPSO* о типизации аэрозоля за 10 мая над территорией Урала (Свердловская область) подтвердил наличие частиц дыма от пожаров в приземном атмосферном столбе высотой до 5 км (рис. 9, *a*), 12 мая дымовой аэрозоль был зарегистрирован над территорией Черного моря (рис. 9, *b*), что подтверждает пространственное распределение данного типа аэрозоля по периферии циклона. Поскольку по спутниковым данным над акваторией Финского залива и территорией Финляндии было зарегистрировано облако дыма, анализ типов аэрозоля по данным *CALIPSO* за 13 мая был проведен для территории, ближайшей к станциям *AERONET Kuopio* и *Hyytiälä*. Как видно из рис. 9, *c*, над территорией Финляндии 13 мая был зарегистрирован дымовой аэрозоль.



**Р и с. 9.** Типизация аэрозоля по спутниковым данным *CALIPSO* над Уралом от 10 мая (*a*), над Черным морем от 12 мая (*b*), над Финляндией от 13 мая (*c*)

**F i g. 9.** Aerosol typing over the Urals on May, 10 (*a*), the Black Sea on May, 12 (*b*) and Finland on May, 13 (*c*) based on the *CALIPSO* satellite data

Сложился ряд факторов, способствующих глобальному переносу и распространению дымового аэрозоля:

1) множественные интенсивные пожары, регистрируемые в Западной Сибири вблизи границы с Казахстаном;

- 2) смена направления приземного ветра с западного на восточное 9 мая 2021 г. над областью интенсивных возгораний;
- 3) накопление дыма в области стагнации, расположенной над Свердловской областью;
- 4) одновременное образование циклона, смещающегося на юго-запад, и антициклона, смещающегося на северо-восток, 10 мая 2021 г.

### **Заключение**

Пожары на Урале регистрируются на протяжении всего года, однако особая пожарная активность наблюдается в весенне-летний период. С 8 по 11 мая 2021 г. были зарегистрированы множественные интенсивные пожары вблизи территории Западной Сибири и границы с Казахстаном. Образующийся в результате горения биомассы дымовой аэрозоль мелкодисперсный, поэтому может переноситься на тысячи километров от зоны зарождения при благоприятных метеорологических условиях.

10 мая установился восточный ветер в нижней части тропосферы, и продукты горения начали распространяться на Урал, а затем по западной периферии антициклона продолжили перемещаться вдоль Уральского хребта на север. Одним из факторов, благодаря которым аэрозоль может перемещаться на значительные расстояния, являются циклонические и антициклонические завихренности, которые и были зарегистрированы 11 мая 2021 г. Циклон, образовавшийся над территорией Волгоградской области, создал благоприятные условия, благодаря которым дымовой аэрозоль был перенесен от места пожаров, регистрируемых в Западной Сибири, в сторону Черного моря, а впоследствии – в направлении территории Финляндии.

По спутниковым данным *VIIRS*, температура поверхностных вод (наблюдавшийся с начала мая прогрев) после прохождения циклона в районе интенсивного ветрового воздействия уменьшилась на 2–3 °С. На пространственную изменчивость распределения хлорофилла *a* циклон не повлиял.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Clouds and aerosols / O. Boucher [et al.] // *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 2013. Chapter 7. P. 571–658. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.016>
2. *Плахина И. Н., Панкратова Н. В., Махоткина Е. Л.* Сравнение данных наземного и спутникового мониторинга аэрозольной оптической толщины атмосферы для территории России // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 2. С. 225–234. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-2-225-234
3. *Гинзбург А. С., Губанова Д. П., Минашкин В. М.* Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // *Российский химический журнал*. 2008. Т. 52, № 5. С. 112–119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-estestvennyh-i-antropogennyh-aerозoley-na-globalnyy-i-regionalnyy-klimat/viewer> (дата обращения: 10.05.2022).

4. *Vermote E. F., Saleous N. Z., Justice C. O.* Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83, iss. 1–2. P. 97–111. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00089-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00089-5)
5. Оптические свойства черноморского аэрозоля и верхнего слоя морской воды по данным прямых и спутниковых измерений / В. В. Суслин [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 20–32. doi:10.22449/0233-7584-2016-1-20-32
6. *Яковлева Д. В., Толкаченко Г. А.* Исследование особенностей дневной изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы над Черным морем // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь, 2008. Вып. 16. С. 212–223.
7. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях / С. М. Сакерин [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25, № 12. С. 1112–1117.
8. *Dubovik O., King M. D.* A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2000. Vol. 105, iss. D16. P. 20673–20696. <https://doi.org/10.1029/2000JD900282>
9. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations / O. Dubovik [et al.] // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2002. Vol. 59, iss. 3. P. 590–608. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2)
10. Результаты измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы в Черноморском регионе (2015–2016) / Д. В. Калининская [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30, № 6. С. 489–496. doi:10.15372/AOO20170607
11. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols / T. F. Eck [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1999. Vol. 104, iss. D24. P. 31333–31349. <https://doi.org/10.1029/1999JD900923>
12. *Кабанов Д. М., Сакерин С. М.* О методике определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в ближнем ИК-диапазоне спектра // *Оптика атмосферы и океана*. 1997. Т. 10, № 8. С. 866–875.
13. *Remer L. A., Kahn R. A., Koren I.* Aerosol indirect effects from satellite: Skeptics vs. Optimists // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. Vol. 73, iss. 13, supplement. A1088. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.014>
14. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm / A. H. Omar [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2009. Vol. 26, iss. 10. P. 1994–2014. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1231.1>
15. *Kalinskaya, D. V., Papkova A. S.* Identification of the marine aerosol by the CALIPSO radiometer over the Black Sea for 2017 // *Proceedings of SPIE*. Tomsk : SPIE, 2018. Vol. 10833 : 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 108335K. <https://doi.org/10.1117/12.2504520>
16. NOAA’s HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System / A. F. Stein [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. Vol. 96, iss. 12. P. 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
17. *Kalinskaya D. V., Kudinov O. B.* Methodology of ground aerosol sources determination based on AERONET and HYSPLIT models data results // *Proceedings of SPIE*. SPIE, 2017. Vol. 10466 : 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 104663R. doi:10.1117/12.2287744
18. *Калинская, Д. В., Папкина А. С., Кабанов Д. М.* Исследование изменчивости оптических и микрофизических характеристик аэрозолей над Черным морем под воздействием пожаров Причерноморья за 2018–2019 годы // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 5. С. 559–570. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-559-570

19. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / С. Ю. Андреев [и др.]. Томск : Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. 483 с.
20. Trends in MODIS and AERONET derived aerosol optical thickness over Northern Europe / P. Glantz [et al.] // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2019. Vol. 71, iss. 1. 1554414. doi:10.1080/16000889.2018.1554414
21. *Schutgens N. A. J., Nakata M., Nakajima T.* Validation and empirical correction of MODIS AOT and AE over ocean // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2013. Vol. 6, iss. 9. P. 2455–2475. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2455-2013>
22. *Hauser A., Oesch D., Wunderle S.* NOAA AVHRR derived Aerosol Optical Depth (AOD) over Land: A comparison with AERONET Data // *Optica Pura y Aplicada*. 2004. Vol. 37, num. 3. P. 3131–3135. URL: [https://www.sedoptica.es/Menu\\_Volumenes/Pdfs/149.pdf](https://www.sedoptica.es/Menu_Volumenes/Pdfs/149.pdf) (date of access: 31.05.2022).

*Об авторах:*

**Калинская Дарья Владимировна**, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus Author ID: 56380591500**, [kalinnskaya@mhi-ras.ru](mailto:kalinnskaya@mhi-ras.ru)