Том 64, Номер 2

ISSN 0030-1574 Март - Апрель 2024







СОДЕРЖАНИЕ

Том 64, номер 2, 2024

-

=

Физика моря

Подобие квазигеострофических вихрей на фоне крупномасштабных баротропных течений <i>В. В. Жмур</i>	181
Наблюдение волн цунами на Тихоокеанском побережье России, возникших при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 года	
И. П. Медведев, Т. Н. Ивельская, А. Б. Рабинович, Е. С. Цуканова, А. Ю. Медведева	197
Химия моря	
Содержание органического углерода в растворенной и взвешенной формах в водах Карского моря <i>Н</i> А. Беляев, В. Ю. Федулов, М. Л. Кравчищина, С. А. Шука	217
Геохимические маркеры трансформации органического вещества восточной части моря Лаптевых	217
<i>Н. А. Шульга, Е. А. Стрельцова, Н. В. Вылегжанина, В. Ю. Феоулов, А.В. Полякова, Е. А. Романкевич</i> Распределение и вариации концентраций элементной серы в верхней части анаэробных вод Черного моря	2/3
А. В. Дубинин, Т. П. Демидова, О. А. Очередник, Л. С. Семилова, М. Н. Римская-Корсакова, Е. Д. Бережная, Е. Н. Зологина	288
Морская биология	
Бактериопланктон западной части Карского моря Н. Д. Романова, М. А. Болтенкова, Е. М Беззубова	299
Зависимость скорости дыхания арктических копепод от веса тела при отрицательной температуре <i>Е. Г. Арашкевич, А. В. Дриц, А. Ф. Пастернак, С. Э. Френкель, В. А. Карманов</i>	308
Происхождение личинок краба-стригуна Chionoecetes Opilio в Карском море Э. В. Липухин, А. К. Залота, А. В. Мишин, У. В. Симакова	320
Различия сообществ мегабентоса восточной и западной частей Карского моря по результатам видеонаблюдений <i>А. А. Удалов, И. М. Анисимов, В. О. Муравья, А. В. Лесин, В. Ю. Кузьмин,</i>	222
<i>А. К. залота, М. В. Чикина</i> Оценка влияния абиотических факторов на распространение зостеры во внутренних бухтах залива Посьета на основе численных экспериментов по моделированию гидродинамики и транспорта наносов	332
С. В. Катрасов, А. Н. Бугаец, В. В. Жариков, С. М. Краснопеев, А. М. Лебедев, В. А. Майнулов	344
Морская геология	
Гранулометрический состав, органический углерод и геохимические маркеры в поверхностном слое донных осадков северо-восточной части Карского моря <i>Е. А. Стрельцова, Н. А. Беляев, В. Ю. Федулов, Е. М. Пушкарева</i>	354
Состояние и прогноз развития отмелого песчаного берега приливного моря (на примере о. Мадагаскар) <i>Н. Н. Дунаев, И. О. Леонтьев, Т. Ю. Репкина</i>	364

Информация

Исследования сероводородного заражения придонного слоя Среднего Каспия в рейсе НИС "Исследователь Каспия" в сентябре 2022 г. Л. А. Духова, А. С. Суворова, А. К. Грузевич, Е. В. Оганесова, А. Д. Кудяков 376

Хроника

90 лет Б. Н. Филюшкину

CONTENS

Volume 64, Number 2, 2024

-

=

Marine Physics

_

The Similarity of Quasi-geostrophic Vortices Against the Background of Large-Scale Barotropic Currents V. V. Zhmur							
Observations of Tsunami Waves on the Pacific Coast of Russia Originating From the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcanic Eruption on January 15, 2022 I. P. Medvedev, T. N. Ivelskaya, A. B. Rabinovich, E. S. Tsukanova, A. Y. Medvedeva							
Marine Chemistry							
Organic Carbon Content in Dissolved and Particulated Forms in the Kara Sea Water N.A. Belyaev, V.Y. Fedulov, M.D. Kravchishina, S.A. Shchuka	217						
Geochemical Markers of Organic Matter Transformation in the Eastern Part of the Laptev Sea N. A. Shulga, E.A. Romankevich, N. V. Vylegzhanina, E. A. Streltsova, V. Yu. Fedulov, A. V. Polyakova	273						
 Distribution and Variations of Elemental Sulfur in the Upper Part of the Black Sea Anoxic Water Column A. V. Dubinin, T. P. Demidova, O. A. Ocherednik, L. S. Semilova, M. N. Rimskaya-Korsakova, E. D. Berezhnaya, E. N. Zologina 	289						
Marine Biology							
Bacterioplankton of the Western Part of the Kara Sea N. D. Romanova, M. A. Boltenkova, E. M. Bezzubova	299						
Relationship between Respiration Rate and Body Weight in Arctic Copepods at Subzero Temperature E. G. Arashkevich, A. V. Drits, A. F. Pasternak, S. E. Frenkel, V. A. Karmanov	308						
The Origin of the Chionoecetes Opilio Snow Crab Larvae in the Kara Sea E. V. Lipukhin, A. K. Zalota, A. V. Mishin, U. V. Simakova	320						
Differences in Megabenthos Communities in the Eastern and Western Parts of the Kara Sea Based on Video Observations <i>A. A. Udalov, I. M. Anisimov, V. O. Muravya, A. V. Lesin, V. Yu. Kuzmin,</i> <i>A. K. Zalota, M. V. Chikina</i>	332						
Assessment of the Abiotic Factors Influence on the Distribution of Zostera in the Internal Bays of Posyet Gulf Based on the Results of Numerical Simulation S. V. Katrasov, A. N. Bugaets, V. V. Zharikov, S. M. Krasnopeev, A. M. Lebedev, V. A Mainulov	344						
Marine Geology							
 Grain Size Distribution, Organic Carbon and Geochemical Markers in the Surface Layer of Bottom Sediments in the Northeastern Part of the Kara Sea E. A. Streltsova, N. A. Belyaev, V. Y. Fedulov, E. M. Pushkareva 	354						
State and Forecast of the Development of the Shallow Sandy Coast of the Tidal Sea (on the Example of Madagascar) <i>N. N. Dunaev, I. O. Leont'yev, T. Yu. Repkina</i>	364						

Information

Studies of Hydrogen Sulfide Contamination of the Deep-Water Basin					
of the Middle Caspian Sea During Cruise of the R/V "Issledovatel Kaspiya" September 2022					
L. A. Dukhova, A. S. Suvorova, A. K. Gruzevich, E. V. Oganesova, A. D. Kudyakov					
Chronicle					

379

Boris Nikonorovich Filyushkin (to the 90th Anniversary of Birth)

УЛК 551.465

ПОДОБИЕ КВАЗИГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НА ФОНЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ БАРОТРОПНЫХ ТЕЧЕНИЙ

© 2024 г. В. В. Жмур*

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия *e-mail: zhmur-vladimir@mail.ru Поступила в редакцию 05.06.2023 г. После доработки 15.06.2023 г.

Принята к публикации 18.07.2023 г.

В работе предлагается теория подобия квазигеострофических вихрей на фоне крупномасштабных течений. Эта теория полезна при планировании лабораторных и численных экспериментов по изучению мезомасштабной и субмезомасштабной вихревой динамики взаимодействующих с течениями вихрей. Особое внимание уделено изучению геометрического подобия явлений. Выявлено, что полный набор безразмерных чисел подобия бароклинных вихрей включает в себя четыре безразмерных параметра: безразмерную интенсивность вихря, геометрическое подобие фонового течения (отношение относительной завихренности к коэффициенту деформации фонового течения), коэффициент горизонтального удлинения вихревого ядра и коэффициент вертикальной сплюснутости вихревого ядра, совпадающий с числом Бургера. Для описания подобия баротропных вихрей на фоне баротропных течений количество необходимых безразмерных параметров уменьшается на одно число — из рассмотрения выбывает коэффициент вертикальной сплюснутости вихревого ядра. При изучении осесимметричных вихрей или близких к ним вихревых структур из рассмотрения выбывает еще один геометрический параметр вихря — коэффициент горизонтального удлинения вихревого ядра. В результате максимально возможный набор параметров подобия включает в себя четыре безразмерных числа, а минимальный — два.

Ключевые слова: вихрь, вихревое ядро, фоновое течение, потенциальная завихренность, относительная завихренность, безразмерные числа подобия, геометрическое подобие DOI: 10.31857/S0030157424020012 EDN: RWXXLD

ВВЕДЕНИЕ

При моделировании океанических процессов лабораторными или численными методами важно соблюдать правила подобия явлений, гарантирующие адекватность результатов натурных и лабораторных исследований. В классической гидромеханике несжимаемой жидкости разработана и успешно применяется теория подобия, которая вкратце сводится к выполнению нескольких тезисов: два явления называются подобными, если соблюдено геометрическое подобие, а также соблюдено равенство безразмерных чисел Рейнольдса и Фруда [13]. При изучении движений вращающейся стратифицированной жидкости к вышеупомянутым безразмерным параметрам добавятся числа Бургера и Россби. Успешное применение теории размерностей в различных задачах геофизической гидродинамики, физики, астрономии изложено в работах Г. С. Голицына [2] и Г. И. Баренблатта [1]. Конечно, перечень работ далеко не полный.

Количество безразмерных чисел, определяющих подобие явлений, может быть уменьшено, если справедливы упрощающие предположения о малости тех или иных эффектов. Например, если с позиций физики эффектами вязкости можно пренебречь, то из условий подобия исчезнет число Рейнольдса. В квазигеострофическом подходе для малых чисел Россби система уравнений сводится к одному уравнению для давления (или для функции тока), в котором может присутствовать только одно безразмерное число Бургера (Bu), указывающее на соотношение эффектов плавучести и вращения. Кроме условия геометрического подобия, это единственный безразмерный параметр в уравнении, от которого также заусловие подобия явлений. висит Если рассматривать квазигеострофические явления с горизонтальным размером L порядка бароклин-

ного радиуса деформации Россби $L_R = \frac{N^*}{f}h$

(N* - характерное значение частоты Вяйсяля-Брента N; f — параметр Кориолиса; h — характерный вертикальный размер явления), то число Бургера $Bu = \frac{L_R}{L}$ окажется порядка единицы, но,

вообше говоря, не выпадет из рассмотрения, хотя диапазон его изменения должен быть сильно ограничен и лежать в районе единицы. В результате в квазигеострофическом подходе из условий подобия останется только равенство чисел Бургера и геометрическое подобие. Что такое геометрическое подобие для вихрей на течениях не особенно ясно. Детализации этого тезиса и посвящена основная часть работы. Если в рамках квазигеострофического подхода использовать какую-либо уже разработанную вихревую модель, то это даст возможность получить набор безразмерных модифицированных параметров в более приемлемой форме использования. Использование размерных уравнений позволит также выделить размерные определяющие параметры, позволяющие сделать численные оценки значимости основных физических характеристик рассматриваемых процессов.

Тем не менее остаются вопросы — сколько безразмерных чисел подобия необходимо для описания вихрей на фоне течения, что такое геометрическое подобие в задачах вихревой динамики и как на это подобие влияют характеристики среды, например частота Вяйсяля—Брента, свойства фоновых течений и т.д.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В квазигеострофическом приближении при малых числах Россби Ro $= \frac{U}{fL} \ll 1$ (*U*—характерная скорость изучаемого процесса) систему уравнений геофизической гидродинамики удается

свести к уравнению для давления p, где p — превышение давления над гидростатическим давлением покоя. Наличие этого давления приводит среду в движение. Данное давление p связано с функцией тока ψ постоянным множителем:

$$\psi = \frac{1}{\rho_0 f} p$$
. Здесь $\rho_0 = \text{const} - \text{средняя по глубине}$

плотность воды. Уравнения для давления и функции тока практически совпадают. Выпишем размерное уравнение для функции тока в квазигеострофическом приближении:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\Delta_h \psi + \frac{\partial}{\partial z} \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + J_h \left(\psi, \Delta_h \psi + \frac{\partial}{\partial z} \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = 0.$$
(1)

Здесь x, y — неподвижные горизонтальные оси системы координат; z — вертикальная ось;

$$J_h(A,B) = \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial B}{\partial x} -$$
определитель Якоби

(якобиан);
$$\Delta_h = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$
 – оператор Лапласа

по горизонтальным координатам. Если функция тока $\psi(x,y,z,t)$ найдена, то можно вычислить все остальные гидродинамические характеристики движения, например, поле скорости (u,v,w)

$$u = -\frac{\partial \Psi}{\partial y}, v = \frac{\partial \Psi}{\partial x},$$

$$w = -\frac{f_0}{N^2} \left[\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t \partial z} + J_h \left(\Psi, \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) \right].$$
(2)

При этом уравнение (1) ухватывает только геострофическую часть горизонтального движения. Агеострофическая компонента скорости в этой постановке мала (порядка Ro) и в приближении (1) получена быть не может.

Уравнение (1) имеет важный физический смысл: оно утверждает, что величина

$$\sigma = \Delta_h \psi + \frac{\partial}{\partial z} \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z}$$
(3)

является лагранжевым инвариантом и переносится вместе с движущейся жидкой частицей. Представим, что вихрь состоит из вихревого ядра и внешней жидкости, захваченной во вращательное движение вихревым ядром. Вихревое ядро представляет собой некий водяной мешок с жидкой свободно деформируемой границей, внутри которой содержится вода с завихренностью σ_{in} , отличающейся от завихренности σ_{out} внешней фоновой жидкости. Для простоты обе величины σ_{in} и σ_{out} будем считать постоянными, равно как и частоту Вяйсяля–Брента. Обозначим $\sigma = \sigma_{in} - \sigma_{out}$ перепад потенциальной завихренности между ядром вихря и фоновой жидкостью.

Закон (3) позволяет выписать распределение потенциальной завихренности в пространстве в виде простого соотношения:

$$\Delta \psi = \begin{cases} \sigma_{\text{in}}, & \text{если}(x, y, \tilde{z}) \in V \\ \sigma_{\text{out}}, & \text{если}(x, y, \tilde{z}) \notin V \end{cases}.$$
(4)

Здесь $\tilde{z} = \frac{N}{f} z$, растянутая в $\frac{N}{f}$ раз вертикальная ось системы координат;

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial \tilde{z}^2}$$
 — объемный оператор

Лапласа в пространстве (x,y,\tilde{z}) ; *V* – деформируемая область пространства, которую занимает вихревое ядро и эволюцию которой следует определить в процессе решения. При отсутствии вихря во всем пространстве наблюдается однородное распределение потенциальной завихренности

$$\Delta \psi = \sigma_{\text{out}} \,. \tag{5}$$

В этом случае решение уравнения (5) $\psi = \psi_f(x, y, \tilde{z})$ представляет собой фоновое течение. При наличии вихря возмущение течения, связанное с вихрем ψ_v , подчиняется уравнению

$$\Delta \Psi_{\nu} = \begin{cases} (\sigma_{\text{in}} - \sigma_{\text{out}}), & \text{если}(x, y, \tilde{z}) \in V \\ 0, & \text{если}(x, y, \tilde{z}) \notin V. \end{cases}$$
(6)

Уравнение (6) с точностью до обозначений совпадает с задачей определения гравитационного потенциала однородного по плотности тела формы *V*.

Задача (6) решается в общем случае для любой формы ядра V в пространстве (x, y, \tilde{z}) [14]:

$$\psi_{v}\left(x,y,\tilde{z},t\right) = -\frac{\sigma}{4\delta} \iiint_{V} \frac{dx'dy'd\tilde{z}'}{\sqrt{\left(x-x'\right)^{2}+\left(y-y'\right)^{2}+\left(\tilde{z}-\tilde{z}'\right)^{2}}}.$$
 (7)

=

В том числе соотношение (7) остается справедливым и при меняющейся во времени форме ядра. Поэтому параметрическая зависимость $\psi_v(x,y,\tilde{z},t)$ от времени скрыта именно в переменной форме ядра.

Пользуясь функцией тока ψ_{ν} , согласно (2), можно найти поле геострофических компонент течения:

$$u_v(x,y,\tilde{z},t) =$$

$$= \frac{\sigma}{4\pi} \iiint_{V} \frac{(y - y')dx'dy'd\tilde{z}'}{\left[\sqrt{(x - x')^{2} + (y - y')^{2} + (\tilde{z} - \tilde{z}')^{2}}\right]^{3}}$$
(8a)

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

$$v_v(x,y,\tilde{z},t) =$$

$$= -\frac{\sigma}{4\pi} \iiint_{V} \frac{(x-x')dx'dy'd\tilde{z}'}{\left[\sqrt{(x-x')^{2} + (y-y')^{2} + (\tilde{z}-\tilde{z}')^{2}}\right]^{3}} \cdot (86)$$

Согласно математическим свойствам решения (7) уравнения (6), соотношение (7) непрерывно вместе с первыми пространственными производными [14]. Это, в свою очередь, означает, что поле давления вместе с полем геострофических течений тоже непрерывно. Непрерывность поля давления автоматически удовлетворяет динамическому условию на поверхности вихревого ядра, где существует разрыв потенциальной завихренности между ядром вихря и окружающей внешней жидкостью. Отметим, что на этом этапе кинематическое условие на той же поверхности еще не выполнено.

Запишем уравнение границы ядра как функцию пространственных координат и времени F(x,y,z,t) = 0. В кинематическом условии на поверхности вихревого ядра

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0$$
(9)

не все слагаемые равноправные. Слагаемое $w \frac{\partial F}{\partial z}$ для наших задач составляет величину порядка O(Ro) от слагаемых

$$u\frac{\partial F}{\partial x}$$
 или $v\frac{\partial F}{\partial y}$. Пользуясь соображениями
о не превышении точности выше, чем O(Ro), от-
бросим в точном уравнении (9) малое слагаемое
 $w\frac{\partial F}{\partial z}$. В результате в нашем квазигеострофиче-
ском приближении кинематическое условие при-
мет вид

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0.$$
(10)

Тот факт, что в кинематическое условие в форме (10) не входит вертикальная скорость, имеет свои последствия. Поскольку (9) и (10) совпадают при $w \equiv 0$, это означает, что трансформация ядра вихря по вертикали отсутствует. Отсюда получаем два эффекта: первое, ядро объемного вихря "зажато" между двумя неподвижными горизонтальными плоскостями, т.е. вертикальный размер ядра не меняется (с точностью до O(Ro)); второе, площадь горизонтального сечения ядра при его деформации баротропным течением на любом горизонтальном уровне сохраняется в той же точности.

Рассмотрим поле фонового течения (5). Положим, что характерный размер течения заметно превышает характерный вихря *L*. Поэтому поле скоростей баротропного фонового течения разложим в ряд Тэйлора в окрестности центра масс рассматриваемого вихря. Поскольку характерный размер течения заметно превышает характерный размер вихря, то можно ограничиться линейными по координатам членами разложения:

$$u_f = u_0 + \tilde{e}x - \tilde{a}_1 y \tag{11a}$$

$$v_f = v_0 + \tilde{a}_2 x - \tilde{e} y \tag{116}$$

$$v_f = 0 \tag{11B}$$

$$\gamma_1 + \gamma_2 = \operatorname{rot}_z \vec{u}_f$$
 (11д)

$$\frac{\partial u_f}{\partial x} + \frac{\partial v_f}{\partial y} = 0.$$
(11e)

При повороте системы координат вокруг вертикальной оси все коэффициенты $\gamma_1, \gamma_2, \tilde{e}$ будут меняться. На первый взгляд поле течений зависит от трех размерных параметров $\gamma_1, \gamma_2, \tilde{e}$, однако сумма двух из них при повороте не меняется: $\gamma_1 + \gamma_2 = \operatorname{rot}_z \tilde{u}_f$, поэтому количество размерных определяющих параметров для фонового течения не три, а два. В явном виде такое утверждение демонстрируется подбором такого поворота системы координат, при котором коэффициенты γ_1 и γ_2 совпадут ($\gamma_1 = \cdot \gamma_1 = \gamma$), при этом коэффициент \tilde{e} в этой системе координат примет некоторое значение *e*.

Перейдя в подвижную систему координат с началом в центре масс ядра вихря, движущуюся со скоростью (u_0, v_0) , получим интегро-дифференциальное уравнение эволюции границы F(x, y, z, t) = 0 вихря (7), приспособленное под цели описания деформации вихревого ядра:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (ex - \tilde{a}y + u_v)\frac{\partial F}{\partial x} + (\tilde{a}x - ey + u_v)\frac{\partial F}{\partial y} = 0.$$
(12)

Задача о поведении равнозавихренного вихревого ядра в баротропном потоке свелась к задаче об эволюции его ядра. Решение (12) в любой момент времени *t* полностью определяет форму ядра вихря F(x,y,z,t) = 0 и позволяет с помощью соотношений (7) – (8) найти все остальные характеристики вихря. Теорию подобия будем излагать с позиции исследования уравнения (12).

Перейдя к дифференцированию по безразмерному времени $\tau = et$ и безразмерным координатам $\overline{x} = \frac{x}{L}$, $\overline{y} = \frac{y}{L}$, а также к интегрированию в выражения скоростей (u_v, u_v) (8а, 8б) по тем же безразмерным переменным $\overline{x}, \overline{y}, \overline{\tilde{z}}$, выпишем уравнение (12) в безразмерном виде

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} + \left(\overline{x} - \frac{\gamma}{e}\overline{y} + \overline{u}_{v}\right)\frac{\partial F}{\partial \overline{x}} + \left(\frac{\gamma}{e}\overline{x} - \overline{y} + \overline{v}_{v}\right)\frac{\partial F}{\partial \overline{y}} = 0 \quad (13)$$

$$\overline{u}_{v} = \frac{1}{4\pi} \frac{\sigma}{e} \iiint_{V'} \frac{(\overline{v} - \overline{v}') d\overline{x}' d\overline{y}' d\overline{z}'}{\left[\sqrt{(\overline{x} - \overline{x}')^{2} + (\overline{v} - \overline{v}')^{2} + (\overline{z} - \overline{z}')^{2}} \right]^{3}} \cdot (13a)$$

$$\overline{v}_{v} = -\frac{1}{4\pi} \frac{\sigma}{e} \iiint_{V'} \frac{\left(\overline{x} - \overline{x'}\right) dx' dy' d\overline{z}'}{\left[\sqrt{\left(\overline{x} - \overline{x'}\right)^{2} + \left(\overline{y} - \overline{y'}\right)^{2} + \left(\overline{z} - \overline{\overline{z}'}\right)^{2}}\right]^{3}} \cdot (136)$$

Само уравнение границы $F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \tau) = 0$ можно сразу считать безразмерным. В полученное интегро-дифференциальное уравнение входит два безразмерных параметра $\frac{\sigma}{e}$ и $\frac{\gamma}{e}$. Если два вихря геометрически подобны в начальный момент времени и для каждого из них соответствующие параметры $\frac{\sigma}{e}$ и $\frac{\gamma}{e}$ совпадают, то интегро-дифференциальные уравнения, описывающее эволю-

цию каждого из них вместе с начальными условиями, окажутся тождественно одинаковыми. Следовательно, поведение вихрей во времени и пространстве будет тоже подобным.

Итак, нами показано, что параметры подобия поведения квазигеострофических вихрей в крупномасштабных фоновых течениях — безразмерные числа $\frac{\sigma}{e}$, $\frac{\gamma}{e}$ и геометрическое подобие гра-

ниц вихревых ядер в начальный момент времени. В таком общем подходе геометрическое подобие выглядит несколько расплывчато. Естественно считать, что подобными вихрями являются вихри с одинаковой формой ядра, отличающиеся только масштабированием всех размеров. Кроме того, подобные вихри должны быть одинаково ориентированы относительно фонового течения. Что

касается масштабирования, то это свойство будет изложено ниже. А вот с ориентацией ядер вихрей относительно фоновых течений дело обстоит сложнее. Дело в том, что для ядер сложной формы может не быть естественных выделенных направлений, эволюцию ориентации которых мы можем связывать с ориентацией вихря в пространстве. Для более простых вихрей, например эллипсоидальных, такие направления существуют. Посмотрим на проблему с позиции уравнения (13). В математической постановке для (13) необходимо задавать начальные условия на форму ядра. В начальную форму автоматически входит ориентация ядра относительно фонового течения. Требование одинаковости начальных условий для лвух вихрей (молельного и реального) в рамках уравнения (13) автоматически приводит к выполнению требуемых условий одинаковой ориентации. Это означает, что условия одинаковой ориентации автоматически заложены в начальные условия задачи и обязаны быть выполненными. Поэтому в дальнейшем мы не будем обсуждать очевидное условие подобия вихрей в течениях по их ориентации относительно течений.

Интересно отметить, что в исходное уравнение сохранения потенциального вихря (1) в безразмерном виде входит число Бургера, которое на этом этапе рассуждений в выводах подобия отсутствует. Естественно предположить, что число Бургера каким-то образом неявно фигурирует в условиях геометрического подобия.

В общем случае выпуклое овальное 3D-ядро имеет три размера — два горизонтальных *a* и *b* (для определенности a > b) и один вертикальный: в физическом пространстве (x,y,z) этот размер обозначим как *c*, а в «растянутом» по вертикали пространстве (x,y,\tilde{z}) , в котором выписано исследуемое уравнение (12), этот же размер будет $\tilde{c} = \frac{N}{f}c$. Из трех размерных параметров *a*,*b* и \tilde{c} можно скомпоновать два безразмерных параметра:

отношение горизонтальных размеров (параметр горизонтальной вытянутости)

$$\varepsilon = \frac{a}{b} \tag{14}$$

и отношение вертикального размера \tilde{c} к характерному горизонтальному размеру $L = \sqrt{ab}$

$$K = \frac{\tilde{c}}{\sqrt{ab}}.$$
 (15)

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

Характерный горизонтальный размер в форме $L = \sqrt{ab}$ нами выбран из соображений удобства, поскольку в частном случае эллипсоидального ядра для описания безразмерной вертикальной характеристики ядра автоматически получается соотношение (15). В (14) и (15) *а* и *b* — горизонтальные полуоси, а \tilde{c} — вертикальная полуось эллипсоида в растянутом пространстве. В исходной работе [11] параметр *К*трактовался как параметр вертикальной сплюснутости. В данной работе те мы оставим в силе это название.

Интересно отметить, что параметр *K* одновременно является и числом Бургера. Действительно, если ввести в рассмотрение радиус деформации Россби $L_R = \frac{N}{f}c$ и характерный горизонтальный размер ядра $L = \sqrt{ab}$, то $K = \frac{\tilde{c}}{\sqrt{ab}} = \frac{L_R}{L}$, что полностью соответствует определения числа Бургера Ви.

Итак, в основном уравнении (13) определились следующие безразмерные числа подобия: $\frac{\sigma}{e}$, $\frac{\gamma}{e}$, ε , K, один из которых $\frac{\sigma}{e}$ характеризует относительную мощность вихря, параметр $\frac{\gamma}{e}$ определяет геометрическое подобие фоновых течений (подобие линий тока) и два последних ε , K описывают геометрическое подобие вихревых ядер.

В частном случае осесимметричных вихрей (или вихрей, близких по геометрии к круглым в плане вихрям с радиусом *R*) параметр $\varepsilon = 1$ фиксирован и выпадает из набора чисел подобия, при этом $K = \text{Bu} = \frac{N}{f} \frac{\tilde{c}}{R}$. В результате остаются три числа подобия $-\frac{\gamma}{e}, \frac{\sigma}{e}, K$.

Неограниченное увеличение параметра *K* равносильно переходу от 3D-бароклинных вихрей к плоскому случаю баротропных вихревых движений. При этом параметр *K* выбывает из общего набора чисел подобия. Следовательно, при изучении эволюции баротропных вихрей в крупномасштабных баротропных течениях остается набор из трех параметров $\frac{\gamma}{e}, \frac{\sigma}{e}, \varepsilon$, определяющих подобие рассматриваемых явлений, а для осесимметричных вихрей их останется два – $\frac{\gamma}{e}, \frac{\sigma}{e}$.

Задача о поведении вихря с ядром эллипсоидальной формы решается точно в рамках квазигеострофического подхода уравнения (1) с учетом кинематического и динамического условий на границе ядра [5, 11, 16, 17, 19]:

$$\psi(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) =$$

$$= -\frac{1}{4} \sigma a b \tilde{c} \int_{\lambda}^{\infty} \left(1 - \frac{\tilde{x}^{2}}{a^{2} + \mu} - \frac{\tilde{y}^{2}}{b^{2} + \mu} - \frac{\tilde{z}^{2}}{\tilde{c}^{2} + \mu} \right) \times \quad (16)$$

$$\times \frac{d \tilde{u}}{\sqrt{(a^{2} + \mu)(b^{2} + \mu)(\tilde{c}^{2} + \mu)}}.$$

Здесь *a*, *b* — горизонтальные полуоси эллипсоида, *c* — его вертикальная полуось, $\tilde{c} = \frac{N}{f}c$ — растянутая в $\frac{N}{f}$ раз вертикальная полуось, \tilde{x}, \tilde{y} — горизонтальные оси координат, направленные по главным осям эллипсоида, $\tilde{z} = \frac{N}{f}z$, растянутая в $\frac{N}{f}$ раз вертикальная ось системы координат. Нижний предел $\lambda(\tilde{x}, \tilde{y}, \eta)$ в интеграле (16) — положительный корень кубического уравнения

$$\frac{\tilde{x}^2}{a^2 + \lambda} + \frac{\tilde{y}^2}{b^2 + \lambda} + \frac{\tilde{z}^2}{\tilde{c}^2 + \lambda} = 1.$$
 (17)

Для пространства внутри ядра вплоть до его границы следует положить $\lambda = 0$. В покоящемся на бесконечности океане ядро вихря вращается без деформации формы вокруг вертикальной оси. Частицы внутри ядра движутся быстрее вращения формы ядра. Детали можно найти в работах [5, 11, 16, 17, 19].

Решение (16) можно интерпретировать как эволюцию эллипсоидального вихря в покоящемся на бесконечности океане (при этом $\sigma_{out} = 0$, а фоновое движение в океане отсутствует). Как было показано ранее [5, 11, 16, 17, 19], граница такого вихря вращается с постоянной угловой скоростью

$$\Omega(\varepsilon, K) = \frac{1}{2} \sigma K \int_{0}^{\infty} \frac{\mu d\mu}{\sqrt{(\mu + \varepsilon) \left(\mu + \frac{1}{\varepsilon}\right) \left(K^{2} + \mu\right)}}.(18)$$

Вращение будем относить к деформации границы ядра. При этом частицы жидкости обгоняют вращение ядра.

В безразмерном виде уравнение (5) приведено ниже:

$$\frac{\psi(\tilde{x},\tilde{y},\tilde{z},t)}{\sigma ab} =$$

$$= -\frac{1}{4}K \int_{\lambda'}^{\infty} \left[1 - \frac{{x'}^2}{\varepsilon + \mu'} - \frac{{y'}^2}{\varepsilon^{-1} + \mu'} - \frac{{z'}^2}{K^2 + \mu'}\right] \times (19)$$

$$\times \frac{d\mu'}{\sqrt{(\varepsilon + \mu')(\varepsilon^{-1} + \mu')(K^2 + \mu')}}.$$

Здесь (x',y',z') – безразмерные координаты $\frac{(\tilde{x},\tilde{y},\tilde{z})}{\sqrt{ab}}$, $\mu' = \frac{\mu}{ab}$. В уравнении (19) появились две безразмерные геометрические характеристики вихревого ядра:

 $\varepsilon = \frac{a}{b}$ — параметр горизонтальной вытянутости и $K = \frac{N}{f} \frac{c}{\sqrt{ab}}$ — параметр сплюснутости ядра по вертикали. Параметр сплюснутости, хотя нами

по вертикали. Параметр сплюснутости, хотя нами относится к геометрическим характеристикам, содержит свойства среды — частоту Вяйсяля— Брента и параметр Кориолиса. Его можно также связать с числом Бургера $\text{Вu} = \frac{L_R}{L}$, в котором радиус деформации Россби определен как $L_R = \frac{N}{f}c$, а характерный горизонтальный размер вихря как

 $L = \sqrt{ab}$. В этом случае Bu = K. Для определенности обе характеристики ε и K мы отнесем к геометрическим свойствам ядра, но число Бургера будем использовать наравне с параметром K.

Нижняя граница безразмерного интеграла (19) запишется в виде

$$\frac{x'^{2}}{\varepsilon + \lambda'} + \frac{y'^{2}}{\varepsilon^{-1} + \lambda'} + \frac{z'^{2}}{K^{2} + \lambda'} = 1$$
(19)

Угловое вращение вихря (18) можно также преобразовать к безразмерному виду в тех же переменных

$$\frac{\Omega(\varepsilon,K)}{\acute{o}} = \frac{1}{2}K\int_{0}^{\infty} \frac{\mu d\mu}{\sqrt{(\mu+\varepsilon)\left(\mu+\frac{1}{\varepsilon}\right)\left(K^{2}+\mu\right)}} \qquad (20)$$

и убедиться, что новых безразмерных характеристик вихревого ядра, кроме чисел є и K, не появилось. Геометрически подобными в покоящемся океане следует считать вихри, у которых совпадают параметры горизонтальной вытянутости є и параметр вертикальной сплюснутости ядра K = Bu. Обратим внимание на то, что в понятие геометрического подобия мы включили и свойства среды. Дело в том, что удобная математическая формулировка задачи (4) и (6) представлена в растянутом по вертикали в $\frac{N}{f}$ раз пространстве. Поэтому характерный вертикальный размер вих-

ревого ядра в этом пространстве тоже увеличился в $\frac{N}{f}$ раз. С некоторыми оговорками указанные

понятия можно распространить и на вихри с ядрами овальной формы в общем случае с тремя разными характерными размерами.

Особый интерес как в теоретических, так и в экспериментальных исследованиях уделяется осесимметричным вихрям. Большинство мощных вихревых образований в океане в плане круглые. В лабораторных условиях круглые вихри легче создать. Рассмотрим условия подобия для осесимметричных вихрей. В этом случае все интегралы (4) и (6) вычисляются в элементарных функциях, но, что более важно, зависят только от одного параметра вертикальной сплюснутости К. Именно этот единственный параметр является параметром подобия для круглых вихрей в покоящейся среде.

Применим разработанную модель подобия к эллипсоидальным вихрям в равнозавихренных баротропных потоках.

Как отмечалось в работах [5, 11, 19], эллипсоидальный вихрь с двумя горизонтальными и одной вертикальной осью, помещенный в равнозавихренный баротропный поток, переносится как целое этим потоком и одновременно им деформируется. Перемещение вихря как целого нас интересовать не будет. Опишем поведение вихревого ядра в системе координат, движущейся вместе с вихрем. В этой системе координат вектор скорости равнозавихренного течения линеен по горизонтальным координатам x, y. Свойство линейности сохранится при повороте системы координат вокруг вертикальной оси, но коэффициенты при повороте, конечно, будут меняться. Для любого такого течения можно подобрать такой поворот осей и найти "удобную" систему координат, в которой неоднородный поток примет вил

$$\begin{cases} u = ex - \gamma y \\ v = \gamma x - ey \end{cases}.$$
 (21)

Неоднородность течения описывается двумя параметрами — коэффициентом деформации е и угловой скоростью вращения частиц жидкости в потоке $\gamma = \frac{1}{2} \operatorname{rot}_z \vec{u}, \quad \vec{u} = (u, v)$ горизонтальный вектор скорости фонового течения.

Изменчивость характеристик вихря, помещенного в течение (21), изучалась в работах [5, 11, 19], откуда следуют уравнения эволюции его параметров:

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 Nº 2 2024

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 2e\varepsilon \cdot \cos 2\theta \tag{22}$$

$$\left|\frac{d\theta}{dt} = \Omega(\varepsilon, K) + \gamma - \frac{\varepsilon^2 + 1}{\varepsilon^2 - 1}e \cdot \sin 2\theta. \right|$$
(23)

В (22), (23) θ – угол, который составляет большая горизонтальная ось эллипсоида (для определенности ось a) с положительным направлением оси *х* системы (21).

Обезразмерим систему (22), (23). В качестве безразмерного времени, как и ранее, примем $\tau = et$. В результате получим описание эволюции ядра вихря в безразмерном виде:

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = 2\varepsilon \cdot \cos 2\theta \tag{24}$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{e} K \int_{0}^{\infty} \frac{\mu d\mu}{\sqrt{(\mu + \varepsilon)\left(\mu + \frac{1}{\varepsilon}\right)\left(K^{2} + \mu\right)}} + \frac{\gamma}{e} - \frac{\varepsilon^{2} + 1}{\varepsilon^{2} - 1} \cdot \sin 2\theta.$$
(25)

В системе (24)-(25) присутствуют следующие безразмерные параметры: два прежних геометрических параметра ядра вихря (є и К) и два новых параметра $-\frac{\sigma}{e}$ – относительная интенсивность вихря и $\frac{\gamma}{e}$ – параметр, описывающий свойство фонового течения (подобие линий тока). Последний параметр сравнивает свойство вращать жидкие объекты со свойством их деформировать. Условие подобия решений системы (12)-(13) — совпадение всех четырех параметров $(\frac{\sigma}{e};\frac{\gamma}{e};\varepsilon;K)$ для двух различных природных или ла-

бораторных ситуаций. В частности, два геометрически подобных эллипсоидальных вихря с одинаковыми потенциальными завихренностями ядра будут одинаково вести себя в одном и том же течении независимо от их реальных физических размеров. Конечно, условия малости числа Россби (условие справедливости квазигеострофического приближения) требуется для каждого из вихрей. Как видим, набор безразмер-

ных параметров $(\frac{\sigma}{e}; \frac{\gamma}{e}; \varepsilon; K)$, определяющих усло-

вия подобия в классе эллипсоидальных вихрей и для вихрей более общего вида, совпали. Этот факт дает обоснованную надежду на то, что предложенный набор безразмерных чисел для объемных вихревых ядер с тремя характерными размерами является универсальным. В случае отсутствия течения безразмерный параметр интенсивности вихря следует заменить на другое выражение. Удобным вариантом является пара-

метр $\frac{\sigma}{f}$. Тем не менее следует отметить, что кро-

ме трех стандартных размеров (длина, ширина и толщина) у вихрей более сложной конфигурации могут возникнуть дополнительные характерные размеры, не учтенные в нашем подходе. Эти случаи требуют дополнительных исследований и в данной работе не обсуждаются.

АВТОМОДЕЛЬНОСТЬ И ТИПЫ ПОВЕДЕНИЯ ВИХРЕЙ

Изучение системы уравнений (12)–(13) показало, что под действием течений (9) существует только три типа поведения ядер эллипсоидальных вихрей: вращение формы, нутационные колебания формы и неограниченное вытягивание одной из горизонтальных осей [5, 11, 19]. В работах [7–10] на плоскости параметров $\left(\frac{\sigma}{e}, \frac{\gamma}{e}\right)$ при фиксированных *K* были представлены зоны вышеуказанных типов поведения вихрей и рассмотрены приложения этой теории к реальному океану. Причем только для режима неограниченного вытягивания оказалась самостоятельная область, где другие типы поведения невозможны. Остальные типы поведения попарно объединены во всех возможных вариантах, а также существует зона, в которой объединены все три типа поведения вихрей. На рис. 1, заимствованном из работы [9], демонстрируются зоны различного поведения вихрей на плоскости параметров $\left(\frac{\sigma}{e}, \frac{\gamma}{e}\right)$ при K = 1.

В работе [7] показано, что границы областей различного поведения вихрей для разных значений параметра *К* самоподобны и могут быть получены из ситуации K = 1 простым растяжением (сжатием) оси $\frac{\sigma}{e}$ с коэффициентом растяжения,

зависящим от *K*. На рис. 2 представлен график коэффициента растяжения как функции от *K*.

Таким образом, схема на рис. 1 совместно с рис. 2 позволяют определить тип поведения бароклинных вихрей (вращение, нутационные колебания или неограниченное вытягивание) подобных эллипсоидальных вихрей на плоскости параметров подобия $\left(\frac{\sigma}{e}; \frac{\gamma}{e}\right)$ при фиксированном

третьем параметре подобия *К*. Для такого анализа не нужен параметр горизонтальной вытянутости, поскольку в такой постановке он является переменной величиной.



Рис. 1. Схема различных типов поведения вихрей в плоскости параметров $\left(\frac{\sigma}{e};\frac{\gamma}{e}\right)$ для K = 1. Серая зона – неограни-

ченное вытягивание вихрей; синяя зона — вытягивание и колебание; зеленая зона — все три варианта (вытягивание, вращение, колебание); красная зона — колебание и вращение (вытягивание запрешено).

Баротропные вихри как частный случай при $K \to \infty$ также содержатся на рис. 1. При увеличении *К* границы областей различного типа поведения вихрей стягиваются к оси ординат, но не достигают ее. Предельно положение этих границ оконтуривает сердцевину серой зоны, в которой бароклинные вихри неминуемо вытягиваются при любых значениях *К*. Одновременно эта сердцевина соответствует зоне неминуемого вытягивания в баротропных течениях вихрей Кирхгофа в 2D-случае. На рис. 2 положение сердцевины и границ синей и зеленой зон для плоских вихрей формально относится к случаю $K \to \infty$, но довольно точно соответствует значению K = 10.

Данные на рис. 1 и 2 относятся к вихрям эллипсоидальной формы, однако все применяемые координаты записаны как безразмерные числа подобия для более общих форм вихревых ядер. Это дает надежду на справедливость качественного поведения вихрей более сложной формы ядра аналогично поведению эллипсоидальных вихрей. Особое место на рис. 1, по-видимому, принадлежит зоне неминуемого вытягивания вихрей (серой зоне) и ее центральной сердцевине, где, как мы ожидаем, вихри любой формы должны неограниченно вытягиваться. Отметим, что сильное вытягивание вихря приведет к тому, что его вихревое ядро выйдет из области справедливости линейной зависимости фонового течения от координат и в результате слишком длинное ядро начнет изгибаться сообразно реальной зависимости поля фонового течения от координат, приобретая сложную геометрическую форму. Аналогично интересной областью на рис. 1 являются две полуплоскости с безразмерными параметрами, накладываемыми на фоновое точение

 $\frac{\gamma}{e} > 1$ (красная зона). Здесь эллипсоидальные

вихри не могут вытягиваться, оставаясь ограниченно-локализованными. Причем какие-либо условия на параметры вихря вообще отсутствуют. В этой зоне от вихрей более сложной формы также следует ожидать, что они при деформации останутся локализованными вихревыми образованиями без заметного вытягивания ядра в горизонтальной плоскости.

Наконец, имеет смысл сделать некоторые замечания по поводу баротропности и равнозавихренности фонового течения в реалии. Вихрь влияет на область, окружающую вихревое ядро, на ограниченных расстояниях порядка размеров самого вихря, то есть вверх и вниз на расстояния порядка толщины вихревого ядра и по горизонтали вокруг ядра на расстояние порядка диаметра вихря. Это свойство получено в расчетах полей течений от вихря (см., например, [5]). Аналогично, вихрь "чувствует" влияние фоновых течений на себя примерно на тех же расстояниях. Естественно ожидать, что течения дальней зоны никак на деформации вихря не сказываются. В результате ограничения, которые мы наложили на поле фонового течения, касаются ближней зоны. Как ведет себя фоновое течение вдали от вихря, нам не важно. Однако с математической точки зрения удобно продлить свойства фоновых течений из ближней зоны на дальнюю, чтобы упростить применение математического аппарата. Именно это и было сделано. В результате удобным фоновым течением оказалось баротропное течение в неограниченном пространстве. Реально же нам требуется баротропное течение в окрестности ядра вихря.



Рис. 2. Коэффициент пропорциональности Ф (*K*) для пересчета границ серой и синей зон для разных значений параметра сплюснутости *K*.

КАКОЙ ВИХРЬ СЧИТАТЬ ИНТЕНСИВНЫМ ПРИ ИЗУЧЕНИИ КОНКРЕТНЫХ ЯВЛЕНИЙ И ПО КАКИМ ПАРАМЕТРАМ СРАВНИВАТЬ ИНТЕНСИВНОСТЬ?

Ответ на этот простой вопрос не так очевиден. Действительно, мы можем предложить несколько критериев, которые в той или иной степени можем связать с интенсивностью вихря. Ниже приведены физические свойства вихрей, по которым можно судить об их интенсивности:

- 1. Потенциальная завихренность ядра.
- 2. Интегральная потенциальная завихренность по объему ядра вихря.
- 3. Относительная завихренность ядра.
- 4. Интегральная относительная завихренность по объему ядра вихря.
- 5. Интенсивность скорости циркуляции.
- Перепад давления между центром вихря и его периферией.
- 7. Величина энергии (кинетической, доступной потенциальной, общей).
- Поток объема воды вихревого ядра, участвующей во вращении.
- 9. Деформация поля плотности (частоты Вяйсяля-Брента).

Этот вопрос особенно интересен для геометрически подобных вихрей, т.е. вихрей, у которых совпадают безразмерные геометрические параметры є и *К*. Могут ли вихри с позиций теории подобия быть разной интенсивности — один из подобных вихрей слабый, а другой сильный. Сам по себе вопрос об интенсивности вихря возникает при обезразмеривании его характеристик.

1. Рассмотрим функцию тока эллипсоидального вихря, представленную соотношением (7). Величина функции тока определяется размерным фактором оаb. При совпадении геометрических параметров подобия є и К є и К двух вихрей более интенсивным с позиции функции тока является тот вихрь, у которого размерный множитель σab больше. По своему физическому смыслу разница функции тока в двух точках на одном горизонте равна потоку вектора скорости через линию, соелиняюшую эти две точки. Например, если в качестве первой точки взять центр вихря, а в качестве второй точки – периферию ядра вихря, причем обе точки — в плоскости главного сечении, то поток скорости больше будет у вихря с большим значением *саb*. Если мы хотим посчитать поток вращающейся массы по всей толщине ядра,

то придется суммировать вышеуказанные потоки по всем горизонтам. Это приведет к умножению параметра σab на вертикальный размер ядра *c*. С учетом того, что объем вихревого ядра равен $V = \frac{4}{3}\pi abc$, фактически мы показали, что среди

подобных вихрей наиболее интенсивно "крутит" большие объемы воды вихрь, у которого больше интегральная потенциальная завихренность ядра σV . В данном случае удобной мерой интенсивности служит параметр σV .

2. Рассмотрим вихрь с позиции величины относительной завихренности. Согласно теории эллипсоидальных вихрей, ротор скорости вихря одинаков во всех внутренних точках вихревого ядра:

$$\frac{\operatorname{rot}_{z}\vec{u}}{\sigma} = \frac{1}{2}K\int_{0}^{\infty} \frac{\left(2\tilde{\mu} + \varepsilon + \frac{1}{\varepsilon}\right) \cdot d\tilde{\mu}}{\left(\tilde{\mu}^{2} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\varepsilon}\right)\tilde{\mu} + 1\right)^{3/2}\left(K^{2} + \tilde{\mu}\right)^{1/2}}.$$
 (26)

Правая часть уравнения (26) одинакова у геометрически подобных вихрей. Следовательно, с позиции величины относительной завихренности ядра среди подобных вихрей наиболее интенсивен вихрь с наибольшей потенциальной завихренностью. Поэтому в данном случае мерой интенсивности следует считать потенциальную завихренность σ. Размеры ядра или его объем в данном случае не важны.

3. Для величины средней скорости циркуляции u_{τ} на периферии главного сечения ядра в работе [6] было получено рабочее соотношение

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{1}{2}} K \int_{0}^{\infty} \frac{d\tilde{\mu}}{\left(\tilde{\mu}^{2} + i\tilde{\mu} + 1\right)^{\frac{1}{2}} \left(K^{2} + \tilde{\mu}\right)^{\frac{3}{2}}}, (27)$$

3десь $i = \varepsilon + \frac{1}{\varepsilon}, -b$ малая горизонтальная по-

луось вихревого ядра. Для подобных вихрей переменной размерной величиной с позиции скорости циркуляции служит характеристика σL (L — характерный горизонтальный размер). В данном случае важно произведение потенциальной завихренности на характерный горизонтальный размер ядра вихря.

Для сильно длинных вихрей (малых поперечных размеров *b*) там же получена асимптотика

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{1}{2}}b\sigma, \qquad (28)$$

указывающая на то, что тонкие в поперечном горизонтальном направлении длинные вихри малоэффективны в индуцировании течений вокруг себя и скорее напоминают пассивную примесь. При изучении скорости циркуляционного движения вокруг вихря параметром, определяющим интенсивность вихря и по которому естественно сравнивать подобные вихря, является σL .

4. Перепад давления δP между центром вихря и его периферией можно определить с точностью до постоянного множителя через разницу в тех же точках функции тока (7). Для геометрически подобных вихрей размерный множитель, определяющий численное значение этой величины, равен σab или, что то же самое, σS или σL^2 , где S – площадь главного горизонтального сечения вихря, L — его характерный горизонтальный размер. Таким образом, с точки зрения величины перепада давления важен квадрат горизонтального размера вихря и потенциальная завихренность его ядра.

5. Наличие вихря меняет поле плотности. В частности, при фоновом значении N_0 частоты Вяйсяля—Брента в вихревом ядре реализуется новая величина этой N частоты, связанная со свойствами вихря соотношением [6]:

$$N^{2} = N_{0}^{2} \left[1 + \frac{1}{f} \frac{\partial^{2} \psi}{\partial \tilde{z}^{2}} \right], \qquad (29)$$

где для внутренних точек ядра вихря справедливо уравнение

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \tilde{z}^2} = \frac{\sigma}{2} K \int_0^\infty \frac{d\tilde{\mu}}{\left(\tilde{\mu}^2 + i\,\tilde{\mu} + 1\right)^{\frac{1}{2}} \left(K^2 + \tilde{\mu}\right)^{\frac{3}{2}}}.$$
 (30)

Как следует из (29), относительное изменение квадрата частоты Вяйсяля—Брента в ядре $\frac{N^2 - N_0^2}{N_0^2}$

связано со свойствами вихря соотношением

$$\frac{N^2 - N_0^2}{N_0^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma}{f} K \int_0^\infty \frac{d\tilde{\mu}}{\left(\tilde{\mu}^2 + i\,\tilde{\mu} + 1\right)^{\frac{1}{2}} \left(K^2 + \tilde{\mu}\right)^{\frac{3}{2}}}, (31)$$

линейным по параметру σ потенциальной завихренности ядра. Отсюда следует, что при оценке эффектов деформации поля плотности вихрем мерой интенсивности вихря может служить потенциальная завихренность ядра. Конечно, нужно учитывать, что для циклонических вихрей (в Северном полушарии $\sigma > 0$) ограничений на величину потенциальной завихренности ядра нет,

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

в то время как для антициклонов (в Северном полушарии $\sigma < 0$ величина $|\sigma|$ не может превысить некоторый пороговый уровень, так чтобы в (29) выполнялось неравенство $1 + \frac{1}{f} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tilde{z}^2} \ge 0$. В дан-

ном случае размер ядра вихря не важен.

6. Рассмотрим с аналогичных позиций энергетику вихря. Согласно работе [6], полная энергия вихря, включающая кинетическую и доступную потенциальную энергию как внутреннего объема ядра, так и его внешней части, выражается соотношением

$$H = \frac{3}{40\pi} \rho_0 \frac{V^2 \sigma^2}{c} K \int_0^\infty \frac{d\tilde{\mu}}{\sqrt{\left(\tilde{\mu}^2 + i\,\tilde{\mu} + 1\right)\left(K^2 + \tilde{\mu}\right)}}.$$
 (32)

Для подобных вихрей переменной размерной характеристикой интенсивности вихря служит блок $\frac{V^2 \sigma^2}{c}$. Сюда входит квадрат интегральной

потенциальной завихренности ядра в числителе и вертикальный размер вихря в знаменателе. Этот же блок можно записать в других, возможно более удобных, переменных — $\sigma^2 L^3 c^2$. Последнее соотношение показывает, что интенсивность вихря с позиций полной энергии зависит как от горизонтальных, так и от вертикальных размеров в разных степенях и, что естественно, от потенциальной завихренности ядра.

Отдельно рассмотрим энергию ядра вихря. В той же работе выведены соотношения двух видов энергии — кинетической H_{core}^{k} и доступной потенциальной H_{core}^{p} . Расчетные формулы приведены ниже:

$$H_{core}^{k} = \frac{1}{40} \rho_{0} \sigma^{2} V_{0} ab K^{2} \times \left\{ \epsilon \left\{ \int_{0}^{\infty} \frac{1}{\epsilon + \mu} \frac{d\mu}{\sqrt{(\epsilon + \mu) \left(\frac{1}{\epsilon} + \mu\right) \left(K^{2} + \mu\right)}} \right\} + \left\{ \frac{1}{\epsilon} \left\{ \int_{0}^{\infty} \frac{1}{\epsilon + \mu} \frac{d\mu}{\sqrt{(\epsilon + \mu) \left(\frac{1}{\epsilon} + \mu\right) \left(K^{2} + \mu\right)}} \right\} \right\}$$
(33)

$$H_{core}^{k} = \frac{1}{40} \rho_0 \sigma^2 V_0 ab \ K^4 \times \left(\int_0^\infty \frac{1}{K^2 + \mu} \frac{d\mu}{\sqrt{(\varepsilon + \mu) \left(\frac{1}{\varepsilon} + \mu\right) \left(K^2 + \mu\right)}} \right)^2.$$
(34)

Размерный множитель, от которого зависит численное значение энергии H_{core}^k и H_{core}^p геометрически подобных вихрей, одинаков — $\sigma^2 V_0 ab$. Этот блок можно записать в более простом виде $\sigma^2 L^4 c$. Численное значение энергии ядра геометрически подобных вихрей зависит степенным образом от горизонтальных и вертикальных размеров вихревого ядра и от квадрата потенциальной завихренности ядра.

Как показано, различные физические свойства вихрей, на которые можно ссылаться при оценке их интенсивности, в общем случае зависят от потенциальной завихренности ядра и двух характерных размеров — горизонтального и вертикального.

Если сравнивать интенсивность геометрически подобных вихрей по относительной завихренности ядра, то единственный размерный параметр, от которого зависит эта характеристика, — это потенциальная завихренность. Размеры ядра не важны. Это же свойство проявляется при сравнении геометрически подобных вихрей по эффекту деформации поля плотности, а именно относительному изменению вихрями частоты Вяйсяля—Брента в ядрах.

Если сравнивать интенсивность геометрически подобных вихрей по скорости циркуляционного движения по периферийной границе ядра, то важным размерным параметром станет произведение σL потенциальной завихренности σ и горизонтального размера ядра *L*. Для геометрически подобных вихрей вертикальный размер не играет роли.

Сравнение подобных вихрей по перепаду давления в центре вихря и на его периферии выводит на первое место параметр σL^2 . При сравнении геометрически подобных вихрей по способности крутить большие объемы воды в своих ядрах параметром сравнения является интегральная потенциальная завихренность ядра σV или σL^2c .

Сравнение энергии геометрически подобных вихрей привело к пониманию, что важными размерными параметрами являются произведение $\sigma^2 L^3 c^2$ различных степеней горизонтального и вер-

тикального размеров ядра вихря (для полной энергии ядра и внешней к ядру вращающейся жидкости) или $\sigma^2 L^4 c$ для кинетической и доступной потенциальной энергии вихревого ядра. Величина указанных параметров $\sigma^2 L^3 c^2$ или $\sigma^2 L^4 c$ может служить мерой интенсивности вихрей при энергетическом сравнительном подходе к вихрям.

В целом во все критерии множителем входит потенциальная завихренность ядра σ в первой или второй степени. Это означает, что интенсивные вихри, по каким бы физическим проявлениям мы их ни сравнивали, должны иметь большую потенциальную завихренность σ . Более детальное рассмотрение физических механизмов воздействия вихрей на конкретные процессы и характеристики вихрей показывает, что интенсивность вихревых структур может измеряться в виде произведения степеней трех характеристик — σ , горизонтального и вертикального размеров L и c.

СТЕПЕНЬ БАРОТРОПНОСТИ ЯДРА БАРОКЛИННОГО ВИХРЯ

Физическая интерпретация основного уравнения (1) — сохранения потенциальной завихренности о у движущихся частиц, которую можно представить как сумму двух составляющих — эффекта от вращения и эффекта от сжатия по вертикали жидких частиц

$$\sigma = \operatorname{rot}_{z} \vec{u} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{f^{2}}{N^{2}} \frac{\partial \Psi}{\partial z}.$$
 (35)

Относительная завихренность $\operatorname{rot}_z \vec{u}$ связана с вращением частиц, а второе слагаемое в (35) описывает вертикальное сжатие (растяжение) частиц. В первом слагаемом $\operatorname{rot}_z \vec{u}$ зависимость поля скорости от вертикальной координаты неважна, но важна зависимость от горизонтальных координат. Во втором слагаемом, наоборот, важна зависимость функции тока именно от вертикальной координаты. Наличие в (35) слагаемого $\frac{\partial}{\partial z} \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z}$ определяет тот факт, что рассматриваемый вихрь

бароклинный. При отсутствии в (35) члена $\frac{\partial}{\partial z} \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \equiv 0$ изучаемый вихрь окажется ба-

ротропным. Таким образом, с позиции потенциальной завихренности бароклинный вихрь состоит из баротропной и бароклинной составляющих, в то время как баротропный вихрь является чисто баротропным. При N = const в предположении эллипсоидальности вихревых ядер обе составляющие вычисляются аналитически для точек внуПОДОБИЕ КВАЗИГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ

три ядра, являются функциями от параметров ε и *K* и одинаковы по всему объему ядра:

$$\frac{\operatorname{rot}_{z}\vec{u}}{\sigma} = \frac{1}{2}K\int_{0}^{\infty} \frac{(2\mu + i)d\mu}{\left(K^{2} + \mu\right)^{\frac{1}{2}}\left(\mu^{2} + i\mu + 1\right)^{\frac{3}{2}}},$$
(36)
$$i = \varepsilon + \frac{1}{\varepsilon}$$

$$\frac{1}{\sigma}\frac{\partial}{\partial z}\frac{f^{2}}{N^{2}}\frac{\partial\psi}{\partial z} = \frac{1}{\sigma}\frac{\partial^{2}\psi}{\partial\tilde{z}^{2}} =$$

$$\approx \frac{d\mu}{\sigma} = \frac{1}{\sigma}\frac{\partial^{2}\psi}{\partial\tilde{z}^{2}} = \frac{1}{\sigma}\frac{\partial^{2}\psi}{\partial\tilde{z$$

$$=\frac{1}{2}K\int_{0}^{\infty}\overline{\left(K^{2}+\mu\right)^{3/2}\left(\mu^{2}+\nu\mu+1\right)^{1/2}}.$$
 (37)

При этом справедлива связь

$$\frac{\operatorname{rot}_{z}\vec{u}}{\sigma} + \frac{1}{\sigma}\frac{\partial^{2}\psi}{\partial\tilde{z}^{2}} = 1, \qquad (38)$$

позволяющая утверждать, что вклад обеих составляющих в потенциальную завихренность ядра меняется при вытягивании или утолщении вихрей. В частности, при увеличении ε и сохранении *К* увеличивается доля баротропной составляющей. Минимальное значение $\frac{\text{rot}_z \vec{u}}{\sigma}$ при фиксированном вертикальном размере ядра соответствует круглому в плане вихрю, при этом интегралы (36), (37) вычисляются в элементарных функциях. В частности, из (36) при $\varepsilon = 1$ следуют соотношения:

$$\frac{\operatorname{rot}_{z}\vec{u}}{\sigma} = \begin{cases} \frac{K}{\left(1-K^{2}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[\operatorname{arccos} K - K\sqrt{1-K^{2}}\right] & \operatorname{при} & 0 < K < 1\\ \frac{2}{3} & \operatorname{прu} & K = 1\\ \frac{K^{2}}{K^{2}-1} + \frac{K}{\left(K^{2}-1\right)^{\frac{3}{2}}} \ln\left(K - \sqrt{K^{2}-1}\right) & \operatorname{пpu} & K > 1. \end{cases}$$
(39)

На рис. 3 изображена зависимость $\frac{\text{rot}_z \vec{u}}{\sigma}$ от па-

раметра *К* согласно (39), указывающая, что для круглых тонких вихрей *К* < 0.6 бароклинная составляющая превосходит вклад от баротропной составляющей $\frac{1}{\sigma} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tilde{z}^2} > \frac{\operatorname{rot}_z \vec{u}}{\sigma}$. Наоборот, для относительно «толстых» вихрей *К* > 0.6 наблюдается обратный эффект. Неограниченное увеличение

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

 $K \to \infty$ как параметра приведет к предельному соотношению $\frac{\operatorname{rot}_z \vec{u}}{\sigma} \to 1$, что соответствует плоской гидродинамике и тому, что относительная завихренность $\operatorname{rot}_z \vec{u}$ сама станет лагранжевым инвариантом. Следует отметить, что значения параметра *K* для вихрей в реальном океане небольшие, порядка 0.1–0.3 и вряд ли превысят 0.4. Поэтому потенциальная завихренность как вихрей верхнего деятельного слоя океана, так и внутритермоклинных линз в основном определяется бароклинной составляющей. Однако в морях Северного Ледовитого океана параметр *К*может приблизиться к единице. Для таких вихрей баротропная и бароклинная составляющие в потенциальной завихренности ядра примерно одинаковые.

ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно предложенной теории, для описания идентичности квазигеострофических вихрей на течениях в натуре и лабораторном (вычислительном) эксперименте требуется от четырех до двух безразмерных параметров. При дополнительных физических условиях по сравнению с условиями нашей теории могут возникнуть и другие безразмерные числа подобия. Рассмотрим несколько экспериментальных работ по близкой тематике. В работах [3, 4] моделировался процесс периодического вихреобразования (образования цепочек вихрей) за мысами и полуостровами в невращающейся и вращающейся средах. В качестве главного исследуемого безразмерного числа подобия выступает число Струхаля и отмечается, что вихреобразование сильнейшим образом связано со свойствами течения. Однако подобие по течениям в эксперименте и натуре в работе не анализируется. Использование параметра подобия течений позволило бы от качественного описания явления перейти к их количественным характеристикам.

В работе [12] изучалась устойчивость первоначально осесимметричных вихрей. Согласно нашей теории, такое явление следовало бы описывать в рамках двух безразмерных чисел — безразмерной интенсивности вихря и числа Бургера (он же — параметр вертикальной сплюснутости ядра). В указанной статье тоже два безразмерных параметра — число Фруда и число Бургера, эквивалентных нашим безразмерным числам. В этом смысле авторы работы [12] использовали все возможности безразмерного подхода. При внесении в эксперимент дополнительного качества — уклона дна бассейна (аналог β-эффекта), в их анализе должен был бы появиться еще один безразмерный параметр. Однако авторы ограничились



Рис. 3. Баротропная составляющая $\frac{\operatorname{rot}_{z}\vec{u}}{\sigma}$ осесимме-

тричного бароклинного вихря в зависимости от параметра вертикальной сплюснутости *К*. График заимствован из работы [18], где он использовался для других целей.

качественным описанием влияния уклона дна на устойчивость вихрей.

Таким образом, рассмотренные немногочисленные примеры показывают, что в ряде экспериментальных работ можно более эффективно использовать аппарат подобия явлений, позволяющий от качественного описания перейти к количественному. Кроме того, в предложенной нами теории присутствует безразмерный параметр геометрического подобия течений $\frac{\gamma}{e}$, где $\gamma = \frac{1}{2} \operatorname{rot}_z \vec{u}$, $\vec{u} = (u, v)$ — горизонтальный вектор скорости фонового течения, а *e* — коэффициент деформации. В физической океанологии, как практической, так и теоретической, rot_z \vec{u} (относительная завихренность) используется активно,

в то время как коэффициент деформации $e = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt}$

(l - размер жидкой частицы в направлении удлинения), как правило, не рассматривается, за редким исключением <math>[5, 7-11, 19].

Предложенная теория подобия не претендует на всеобщность, хотя бы из-за того, что в физической постановке отсутствует β -эффект, а число Россби предполагается малым. В случае учета обоих факторов число безразмерных параметров, описывающих более общие явления, увеличится как минимум на два: число Россби и безразмерное число, привязанное к β -эффекту. Роль последнего может выполнять следующие безразмерные комбинации: $\beta L/\Gamma$ (L — характерный горизонтальный размер явления, Γ — величина характерного горизонтального градиента фоновой скорости) или $\beta L^2/U$ (U — характерная скорость фонового потока). Последним вариантом пользовались К. Н. Федоров и А. И. Гинзбург [15], при оценке роли β -эффекта и нелинейности в динамике локализованных вихрей океана.

выводы

В работе изложены критерии подобия для квазигеострофических 3D-вихрей на фоне крупномасштабных баротропных течений в стратифицированной по плотности вращающейся жидкости.

Показано, что в общем случае в условиях задачи существует четыре критерия подобия, три из которых связаны с геометрическим подобием (два — с геометрическим подобием вихревых ядер, один — с геометрическим подобием фоновых течений) и один критерий относится к относительной интенсивности вихря — подобие интенсивностей вихрей. Число Бургера, входящее в основное уравнение при описании вихрей, также является одним их критериев подобия, но в нашем случае мы его трактуем как одно из безразмерных параметров геометрического подобия. Несколько неожиданным оказалось, что в критерии геометрического подобия как элемент входит фоновая частота Вяйсяля-Брента. Полный набор безразмерных параметров подобия для бароклин-ных вихрей в баротропных течениях $-((\frac{\sigma}{e}; \frac{\gamma}{e}; \varepsilon; K)).$

Параметр $\frac{\sigma}{e}$ ответственен за подобие по интенсивности вихрей, параметр $\frac{\sigma}{e}$ отвечает за подобие течений, параметр ε — геометрическое подобие

в горизонтальной плоскости, параметр *K* (он же число Бургера) отвечает за подобие по вертикали.

Для описания подобия баротропных вихрей под воздействием баротропных течений необходимы три параметра подобия $(\frac{\sigma}{e}; \frac{\gamma}{e}; \varepsilon)$.

Для осесимметричных вихрей, как бароклинных, так и баротропных, один из геометрических параметров подобия вихрей ε из рассмотрения выпадает и остается для бароклинных вихрей три критерия подобия — геометрическое подобие вихря по вертикали, геометрическое подобие течений и подобие интенсивностей вихрей ($\frac{\sigma}{\rho}; \frac{\gamma}{\rho}; K$),

а для описания подобия баротропных вихрей под воздействием баротропных течений необходимы два параметра подобия $\left(\frac{\sigma}{e}, \frac{\gamma}{e}\right)$.

Применительно к эллипсоидальным вихрям предложена новая трактовка карты зон различного типа поведения вихрей в безразмерных координатах параметров подобия. Продемонстрирована автомодельность границ вышеуказанных зон.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Института океанологии РАН им. П. П. Ширшова FMWE-2023-0002 (исследование подобия вихрей, первая часть статьи) и гранта РНФ № 22-17-00267 (изучение сопутствующих явлений, вторая часть статьи).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Баренблатт Г. И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 256 с.
- 2. Голицын Г. С. Статистика и динамика природных процессов и явлений: Методы, инструментарий, результаты. М.: Из-во «Красанд», 2012. 400 с.
- 3. *Елкин Д. Н., Зацепин А. Г.* Лабораторное исследование механизма периодического вихреобразования за мысами в прибрежной зоне моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
- 4. *Елкин Д. Н. Зацепин А. Г.* Лабораторное исследование механизма сдвиговой неустойчивости морского вдольберегового течения // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 614–621.
- 5. *Жмур В. В.* Мезомасштабные вихри в океане. М.: ГЕОС, 2011. 290 с.
- 6. *Жмур В. В., Арутюнян Д. А.* Перераспределение энергии при горизонтальном вытягивании океанских вихрей баротропными течениями // Океанология. 2023. Т. 63, № 1. С. 3–19. https://doi. org/10.31857/S0030157423010185
- Жмур В. В., Белоненко Т. В., Новоселова Е. В. и др. Эволюции мезомасштабных вихрей океана в неоднородных баротропных течениях // ФАО. 2023 (в печати).
- 8. Жмур В. В., Белоненко Т. В., Новоселова Е. В., Суетин Б. П. Прямой и обратный каскад энергии при вытягивании вихрей в океане // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 508. № 2. С. 270–274. https://doi.org/10.31857/ S2686739722602113
- 9. Жмур В. В., Белоненко Т. В., Новоселова Е. В., Суетин Б. П. Условия трансформации мезомас-

штабного вихря в субмезомасштабную вихревую нить при вытягивании его неоднородным баротропным течением // Океанология. 2023. Т. 63. № 2. С. 200–210. https://doi.org/10.31857/ S0030157423020144

- 10. Жмур В. В., Белоненко Т. В., Новоселова Е. В., Суетин Б. П. Приложение к реальному океану теории трансформации мезомасштабного вихря в субмезомасштабную вихревую нить при вытягивании его неоднородным баротропным течением // Океанология. 2023. Т. 63. № 2. С. 211–223. https:// doi.org/10.31857/S0030157423020156
- 11. *Жмур В. В., Панкратов К. К.* Динамика эллипсоидального приповерхностного вихря в неоднородном потоке // Океанология. 1989. Т. 29. № 2. С. 205–211.
- 12. Зацепин А. Г., Елкин Д. Н., Шварцман Д. Р. Предварительные результаты лабораторных исследований эволюции нефронтальных вихрей в двуслойной вращающейся жидкости // Океанологические исследования. 2023. Т. 51. № 1. С. 5–35.
- 13. *Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В.* Теоретическая гидромеханика. Т. 2. ОГИЗ. М., Л.: Гостехиздат, 1948. 612 с.
- 14. *Тихонов А. Н., Самарский А. А.* Уравнения математической физики. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1977. 736 с.
- 15. *Fedorov K. N., Ginsburg A. I.* "Mushroom-like" currents (vortex dipoles) in the ocean and in a laboratory tank // Annales Geophys. 1986. V. 4B, N^o 5. P. 507–516.
- 16. *Meacham S. P.* Quasigeostrophical ellipsoidal vortices in stratified fluid // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 1992. V. 16. № 3–4. P. 189–223.
- Meacham S. P., Pankratov K. K., Shchepetkin A. F., Zhmur V. V. The interaction of ellipsoidal vortices with background shear flows in a stratified fluid // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 1994. V. 21. № 2-3. P. 167-212. https://doi.org/10.1016/0377-0265(94)90008-6.
- *Zhmur V. V., Novoselova E. V., Belonenko T. V.* Peculiarities of formation of the density field in mesoscale eddies of the Lofoten Basin: Part 1 // Oceanology. 2021. V. 61. № 6. P. 830–838. https:// doi.org/10.1134/S0001437021060333
- 19. *Zhmur V. V., Pankratov K. K.* Dynamics of desingularized quasigeostrophic vortices // Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. 1991. V. 3. № 5. P. 1464–1464. https://doi.org/10.1063/1.857998.

THE SIMILARITY OF QUASI-GEOSTROPHIC VORTICES AGAINST THE BACKGROUND OF LARGE-SCALE BAROTROPIC CURRENTS

V. V. Zhmur[#]

Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia #e-mail: zhmur-vladimir@mail.ru

The paper proposes a theory of similarity of quasi-geostrophic vortices against the background of large-scale flows. This information is useful when planning laboratory and numerical experiments to study mesoscale and submesoscale vortex dynamics of vortices interacting with currents. Special attention is paid to the study of geometric similarity of phenomena. It is revealed that the complete set of dimensionless similarity numbers of baroclinic vortices includes four dimensionless parameters: the dimensionless intensity of the vortex, the geometric similarity of the background flow (the ratio of relative vorticity to the deformation coefficient of the background flow), the coefficient of horizontal elongation of the vortex core and the coefficient of vertical oblateness of the vortex core coinciding with the Burger number. To describe the similarity of barotropic vortices against the background of barotropic flows, the number of necessary dimensionless parameters is reduced by one number — the coefficient of vertical oblateness of the vortex core is eliminated from consideration. When studying axisymmetric vortices or vortex structures close to axisymmetric, another geometric parameter of the vortex is eliminated from consideration — the coefficient of horizontal elongation metrics are submitted four dimensionless are submitted.

Keywords: vortex, vortex core, background flow, potential vorticity, relative vorticity, dimensionless similarity numbers, geometric similarity

——— ФИЗИКА МОРЯ ——

УДК 551.466

НАБЛЮДЕНИЕ ВОЛН ЦУНАМИ НА ТИХООКЕАНСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ, ВОЗНИКШИХ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХУНГА-ХААПАЙ 15 ЯНВАРЯ 2022 ГОДА

© 2024 г. И. П. Медведев^{1, *}, Т. Н. Ивельская², А. Б. Рабинович¹, Е. С. Цуканова¹, А. Ю. Медведева^{1, 3}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия ² Центр цунами Сахалинского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Южно-Сахалинск, Россия ³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия *e-mail: patamates@gmail.com Поступила в редакцию 10.07.2023 г. После доработки 02.08.2023 г. Принята к публикации 18.12.2023 г.

Извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г. вызвало цунами, которое затронуло весь Тихий океан. Было установлено, что зарегистрированные волны цунами от этого события были сформированы как волнами, приходящими из района источника со скоростью океанских длинных волн (~200–220 м/с), так и атмосферной волной, распространяющейся со скоростью звука (~315 м/с). Такой двойной механизм источника создал серьезную проблему и явился настоящим вызовом для существующих служб предупреждения о цунами в Тихом океане. Подробно рассматривается работа Российской службы предупреждения о пунами (Южно-Сахалинск) во время этого события. Цунами было четко зарегистрировано на побережье северо-западной части Тихого океана и в прилегающих окраинных морях, включая Японское, Охотское и Берингово. В работе исследуются полученные с высоким разрешением (1 мин) записи 20 мареографов и 8 станций атмосферного давления в этом регионе за период 14-17 января 2022 года. На российском побережье самые большие волны с высотой от подошвы до гребня 1.3 м были зарегистрированы на станциях Малокурильское (о. Шикотан) и Водопадная (юго-восточное побережье Камчатки). Используя методы численного моделирования и анализа данных, океанские «гравитационные» волны были отделены от «атмосферных» волн давления. В целом, было обнаружено, что на внешних (океанских) побережьях и южном побережье Охотского моря преобладают океанические волны цунами, в то время как на побережье Японского моря океанические и атмосферные волны цунами имеют близкие высоты.

Ключевые слова: цунами, вулкан Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, Тихий океан, волны Лэмба, Охотское море, Японское море, Служба предупреждения о цунами, извержение вулкана **DOI:** 10.31857/S0030157424020021 **EDN:** RWWLXG

введение

Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (далее Хунга-Тонга) — подводный вулкан, расположенный в южной части Тихого океана между двух необитаемых островов Хунга-Тонга и Хунга-Хаапай, примерно в 65 км к северу от Тонгатапу, главного острова архипелага Тонга. Данный вулкан — один из элементов протяженной «горячей» сейсмоактивной субдукционной зоны Тонга-Кермадек, протянувшейся от Новой Зеландии до островов Фиджи (рис. 1). После семилетнего затишья (с 2014 г.) вулкан начал активно извергаться во второй половине декабря 2021 г. [17, 36]. Резкая интенсификация процесса началась 14 января 2022 г. На следующий день, 15 января 2022 г. в 04:15 UTC, произошел сильнейший взрыв вулкана, который был зафиксирован на многочисленных спутниковых фотографиях (см., например, [15, 21, 56]). Атмосферные волны, вызванные извержением, достигли ионосферы [19, 50, 57] и несколько раз обогнули земной шар [16, 35, 38].

По своему масштабу и глобальному эффекту это событие для современной инструментальной эпохи является уникальным. Известны только два сходных исторических события подобного масштаба: (1) взрыв вулкана Санторин (о. Тира) в Средиземном море, произошедший около 1600 лет до н.э. (см., например, [36, 43]); (2) катастрофическое извержение вулкана Кракатау в Зондском архипелаге (Индонезия) в 1883 г., которое также вызвало сильнейшие атмосферные волны и другие аномальные геофизические явления [24, 45].

Как показывают современные оценки, взрыв вулкана Санторин сгенерировал сильнейшее цунами, которое обрушилось на острова Эгейского моря, в частности на северное побережье о. Крит, и, как предполагают ученые, стало одной из причин гибели минойской цивилизации. Естественно, никаких достоверных измерений цунами в то время не существовало и никакие хроники до нашего времени не дошли, но некоторые оценки высот волн были получены на основе численного моделирования, археологических данных и данных об отложениях цунами [43].

В противоположность взрыву вулкана Санторин, произошелшему 3600 лет назал, извержение вулкана Кракатау в 1883 г. хорошо задокументировано, и его описание вошло в многочисленные книги и учебники (см., например, [7, 9]). Атмосферные волны были зарегистрированы по всему земному шару [22]. Извержение вызвало катастрофические волны цунами высотой свыше 30 м и привело к гибели 36 тыс. жителей близлежащих индонезийских островов [9]. Цунами было зарегистрировано примерно на 30 мареографах, расположенных в различных районах Мирового океана, включая столь удаленные как Гавр (Франция), Портленд и Давенпорт (оба Великобритания) в проливе Ла-Манш, Колон (Панама), Сан-Франциско (Калифорния, США) и Кодьяк (Аляска, США) [44]. При этом, как было показано в работах [22, 24, 27], колебания уровня моря на этих удаленных станциях были вызваны не прямой волной цунами, пришедшей из источника, а атмосферными волнами, взаимодействующими с океаном, т.е. фактически это были «метеоцунами» [41]. Заметим, что в 1883 г. как регистрации атмосферных волн, так и регистрации волн цунами мареографами представляли собой аналоговые бумажные записи; соответственно для анализа этих записей требовалась их предварительная аккуратная оцифровка [44].

Ситуация со взрывом вулкана Хунга-Тонга иная. Это событие, в отличие от взрыва Кракатау, не сопровождалось многочисленными жертвами: в общей сложности погибло шесть человек, из них четверо – на островах Тонга и двое – в Перу; еще 19 человек было ранено (https://en.wikipedia. org/wiki/2022_Hunga_Tonga%E2%80%93Hunga_ Ha%27apai_eruption_and_tsunami). Однако это подводное извержение и волны от него имели

планетарный масштаб, они были зарегистрированы тысячами высокоточных цифровых приборов, включая микробарографы, береговые мареографы и глубоководные измерители волн цунами (см., например, [16, 31, 32, 34, 35, 37, 49] и др.). Как и при извержении вулкана Кракатау, взрыв вулкана Хунга-Тонга привел к формированию океанских волн цунами под действием двух различных механизмов внешнего воздействия. Первый тип волн цунами сформировался непосредственно вблизи области извержения вулкана и в дальнейшем распространялся по Тихому океану со скоростью длинных океанских волн (~200-220 м/с в глубоководной части океана). Взрыв вулкана также сгенерировал более быстрые атмосферные волны Лэмба [16, 35, 38], которые распространялись вокруг земного шара со скоростью звука (около ~300-320 м/с), т.е. примерно в полтора раза быстрее океанских волн. Эти атмосферные волны сгенерировали второй тип волн цунами, которые можно назвать "метеоцунами" или "атмосферными цунами"; они проявились во многих частях Мирового океана, включая Тихий, Атлантический и Индийский океаны, Средиземное море, Мексиканский залив и др. (см., например, [16, 18, 30, 31, 35, 42, 48, 49]).

Оба типа волн, образовавшихся вследствие извержения вулкана Хунга-Тонга, ярко проявились на Тихоокеанском побережье России [2, 51]. При этом Российской службе предупреждения о цунами (СПЦ) удалось успешно преодолеть проблемы, возникшие при оперативном прогнозе столь сложного явления. Большую помощь в этом отношении оказали глубоководные станции DART¹, установленные в северо-западной части Тихого океана, а также островные и японские береговые мареографы. В настоящем исследовании рассматриваются вопросы, связанные с функционированием СПЦ во время этого экстраординарного события, анализируется характер проявления волн цунами на побережье России и в близлежащих районах, оцениваются основные статистические параметры наблюденных волн.

ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ЦУНАМИ

Российская СПЦ — это важный элемент Тихоокеанской системы предупреждения о цунами (ТСПЦ)². Отечественная СПЦ была создана в 1958—1959 гг. как реакция на катастрофическое цунами 5 ноября 1952 г., которое, по разным данным, привело к гибели от 2—4 тыс. [14] до 15— 17 тыс. человек [11] на Курильских о-вах и Камчатке. При ее создании изначально предполагалось,

¹ Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART) – глубоководная система датчиков, развернутая Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (NOAA, США) вдоль сейсмически активных областей Тихого океана для мониторинга волн цунами.

² Pacific Tsunami Warning System (PTWS).

что наибольшую угрозу для российского побережья представляют землетрясения с очагами, непосредственно прилегающими к этому побережью (т.е. землетрясения, происходящие в Курило-Камчатской, Алеутской и Японской зонах субдукции). Однако сокрушительное Чилийское цунами 22 мая 1960 г. показало, что удаленные землетрясения, особенно с очагами, расположенными в Чилийской зоне субдукции, также представляют серьезную угрозу для побережья России [4, 14, 40]. Чилийское цунами было вызвано землетрясением с моментной магнитудой $M_{\rm w} = 9.5$, сильнейшим за все время инструментальных измерений. Образовавшаяся волна прошла через весь Тихий океан, приведя к многочисленным человеческим жертвам и серьезным разрушениям на побережьях Гавайских о-вов, Филиппин и Японии [12, 33]. Через проливы Курильской гряды волна зашла в Охотское море и обрушилась на о. Сахалин и северо-западное материковое побережье. В бухте Нагаева в районе Магадана высота волны (от подошвы до вершины) превысила 4 м; на северо-восточном шельфе о. Сахалин (т.е. в районе, где в настоящее время ведутся активные работы по добыче нефти и газа) наблюдались волны цунами до 2.5 м [4, 14]. Это событие наглядно показало, что волны цунами — это глобальное явление, и без широкого международного сотрудничества эффективное предупреждение и борьба с ним невозможны.

Именно после Чилийского цунами 1960 г. была создана ТСПЦ с центром в Гонолулу на Гавайских островах, США (ТЦПЦ)¹, и налажена конструктивная система оперативной связи между всеми тихоокеанскими странами, находящимися под угрозой волн цунами [33]. Большую помощь в этом оказывает Межправительственная координационная группа по Системе предупреждения цунами в Тихом океане², которая работает под патронажем Межправительственной океанографической комиссии (МОК) ЮНЕСКО, активным участником которой является Россия. Российская СПЦ успешно взаимодействует с ТСПЦ и Японской СПЦ (ЯСПЦ); никакие политические разногласия или проблемы не мешают взаимодействию служб предупреждения о цунами. В частности, телеграмма Японского метеорологического агентства (ЯМА), сообщившая об угрозе цунами 7 ноября 1958 г., позволила объявить тревогу цунами для Южно-Курильского района за 15-18 мин до прихода волн [13, 14]. Активное взаимодействие международных СПЦ сыграло ключевую роль в своевременном и эффективном предупреждении о разрушительном Тохоку цунами в Японии в 2011 г., вызванном сильнейшем землетрясением $M_w = 9.1$ с очагом у северо-восточного побережья о. Хонсю (Япония). Большую помощь при оценке степени опасности этого цунами также оказали глубоководные станции DART, установленные вдоль океанского шельфа Аляски, Алеутских о-вов, Камчатки, Курильских и Японских о-вов. Именно благодаря этим двум факторам (международному сотрудничеству и обмену информацией и высокоточным данным о высотах волн цунами в открытом океане на подходе к берегам России) удалось избежать человеческих жертв и минимизировать разрушения на российском побережье. Эти же два фактора позволили обеспечить достаточно точный оперативный прогноз Тонга цунами в 2022 г.

Методология и система сушествующей в настояшее время Российской СПШ описана в работе [14]. Дополнительные подробности, связанные с оперативным прогнозом отдельных событий, приведены в работе [8]. Основной критерий, который используется СПЦ при оценке степени опасности отдельных землетрясений, - магнитудно-географический: для различных сейсмоактивных районов Мирового океана установлено пороговое значение магнитуды M_s (определяемой по поверхностным волнам), при котором для российского побережья объявляется тревога цунами [14]. Нижнее «цунамигенное» значение магнитуды составляет $M_s = 7.0$. Считается, что при меньших значениях магнитуды землетрясений цунами в Тихом океане не образуются. Однако этот критерий относится только к цунами, вызванным подводными землетрясениями, и не применим для цунами другой природы. Сейсмический толчок, сопровождавший взрыв вулкана Хунга-Тонга, был всего $M_{\rm w} \sim 5.5$, т.е. формально такое событие не должно было считаться опасным для побережья России. Однако 15 января в 22:25 Сахалинского времени (SAKT³, 11:25 UTC) в Российскую СПЦ поступило сообщение из Национального центра предупреждения о цунами (НЦПЦ) о том, что в 04:27 UTC в районе островов Тонга произошло извержение подводного вулкана (на самом деле основной взрыв произошел в 04:15 UTC) и что данное событие может сгенерировать цунами за пределами эпицентра. 16 января в 00:11 SAKT было получено предупреждение из Тихоокеанского центра (ТЦПЦ) об угрозе цунами для районов, находящихся в зоне трехчасового добегания зародившейся волны. При этом была дана следующая оценка: "Нет возможности предсказать амплитуду волн. Дан прогноз добегания волн и регистрации цунами".

¹ Тихоокеанский центр предупреждения о цунами (PTWC = NOAA Pacific Tsunami Warning Center, Honolulu, Hawaii: https://www.un-spider.org/noaa-pacific-tsunami-warning-center-ptwc) отвечает за весь Тихий океан. Национальный центр предупреждения о цунами, NTWC, National Tsunami Warning Center, Palmer, Alaska: https://www.tsunami.gov/?page=history#2, отвечает за северо-восточную часть Тихого океана.

² Intergovernmental Coordination Group for the Pacific Tsunami Warning and Mitigation System (ICG/PTWS), бывшая ITSU.

³SAKT – Сахалинское время, UTC+11.

В дальнейшем НЦПЦ и ТЦПЦ продолжали передавать сообщения о тревоге. В результате в 01:08 SAKT дежурный океанолог передал в ЦУКС МЧС России по Сахалинской области сообщение о необходимости оповещения портов и портопунктов Курильских островов о возможности подхода слабого цунами с рекомендациями ограничения работ в порту, соблюдений правил безопасности на берегу. Руководство СахУГМС было поставлено в известность о развитии событий, установлены постоянные наблюдения за уровнем моря на ГМС Курильских о-вов.

В 02:15 SAKT получен бюллетень от ЯСПЦ: предупреждение цунами действует для южной части Японских островов: для Тихоокеанского побережья северных Японских островов действует режим «консультация» цунами. Спустя 11 минут ЯСПЦ передало первые сообщения о времени и высотах волн цунами на японских станциях; в дальнейшем, по мере распространения волн цунами, уточняющая информация передавалась непрерывно, что было чрезвычайно ценно для Российской СПЦ. Также непрерывно поступала оперативная информация из НЦПЦ и ТЦПЦ. В 04:00 SAKT информация о событии была передана в ТАСС. В 05:15-05:18 SAKT режим оповешения продлен для всей территории Курильских островов. В 07:30-09:00 SAKT продолжает поступать информация из ЯСПЦ, НЦПЦ и ТЦПЦ, подтверждающая, что угроза цунами сохраняется. В 09:10-12:00 SAKT поступают бюллетени от NOAA и различных зарубежных служб с данными высот зарегистрированных цунами по наблюдениям береговых мареографов и глубоководных станций DART; сохраняется консультативный режим и угроза цунами для соответствующих Тихоокеанских побережий. В 12:18 SAKT получено фото мареографной ленты с записью цунами высотой 1.3 м на ГМС "Малокурильское"; в дальнейшем стала приходить информация о регистрации данного цунами от автоматизированных постов наблюдений за уровнем моря Сахалинской области, Камчатки и Приморского края.

В 13:55 SAKT получен финальный бюллетень ТЦПЦ об окончании угрозы цунами и передана информация о зарегистрированных высотах волн цунами по всей акватории Тихого океана. В 14:51 SAKT объявлено об окончании режима "оповещение портов и портопунктов" на Курильских о-вах. Продолжительность действия оповещения о цунами составила 13 часов.

Данное цунами оказалось очень сложным для прогноза и оперативного оповещения. Российская служба СПЦ столкнулась с тремя основными проблемами:

1. Отсутствие какой-либо информации о начальном очаге цунами, что не позволило получить даже самые грубые предварительные оценки ожидаемых высот волн. В бюллетенях ТЦПЦ (Гонолулу, США) указывалось на невозможность выполнения расчетов высот волн цунами ввиду отсутствия подобной информации.

2. Возбуждение при взрыве сильных атмосферных колебаний (волн Лэмба), распространявшихся со скоростью звука (т.е. в полтора раза быстрее длинных океанских волн), которые, в свою очередь, вызвали генерацию волн цунами, наблюдавшихся не только в Тихом, но и в Атлантическом и Индийском океанах, Карибском бассейне и Средиземном море. При этом в отдельных акваториях возникали вторичные источники волн цунами (подобно тому, как это происходило в 1883 г. во время извержения вулкана Кракатау [24]); прогнозировать в такой ситуации высоты волн цунами и время их прихода крайне затруднительно; выявить волны цунами можно только в процессе их распространения по факту регистрации. Следует подчеркнуть, что прогнозирование волн цунами несейсмического происхождения является серьезным вызовом для научного сообщества и требует разработки принципиально новых полходов.

3. Работа "вслепую" при отсутствии современной цифровой аппаратуры на океанской стороне Курильской гряды (т.е. в районе, наиболее подверженном угрозе волн цунами) и крайней затруднительности визуальных наблюдений в ночное время значительно осложнила оценку степени угрозы волн цунами для российского побережья. Максимальные зарегистрированные высоты волн цунами, до 1.3 м, были получены в Малокурильском (о. Шикотан)¹ с помощью архаичного аналогового мареографа, установленного в этом поселке несколько десятков лет назад. Эта проблема требует скорейшего решения, подобного тому, как это в последние годы было выполнено в целом ряде других стран, подверженных угрозе волн цунами (Чили, Мексика, Индонезия, Индия, островные государства Тихого и Индийского океанов). Необходима установка высокоточных цифровых приборов, обеспечивающих непрерывный мониторинг волн цунами и родственных явлений вдоль всего Дальневосточного побережья России.

Как отмечалось выше, оперативное оповещение об угрозе волн цунами и защиту населения прибрежных районов Дальневосточного региона во многом удалось решить благодаря активному использованию международной системы мониторинга волн цунами и эффективному взаимодействию с ЯСПЦ, НЦПЦ и ТЦПЦ.

¹На станции Водопадная высота волн цунами составляла также 1.3 м.

ДАННЫЕ

Для анализа проявления на российском побережье волн цунами, вызванных извержением вулкана Хунга-Тонга, были использованы все доступные ряды наблюдений: 20 цифровых записей изменений уровня моря Российской СПЦ с дискретностью 1 минута и одна аналоговая запись (Малокурильское). Семь приморских станций (Посьет, Владивосток, Находка, Преображение, Рудная Пристань, Сосуново и Советская Гавань) и две сахалинские (Холмск и Углегорск), которые расположены на северном и северо-западном побережьях Японского моря (рис. 1, таблица); станции Корсаков, Стародубское, Поронайск и Курильск измеряют изменения уровня Охотского моря; четыре станции (Озерная, Водопадная, Петропавловск-Камчатский, Семячик) расположены на Тихоокеанском побережье Камчатского п-ва, одна (Никольская) – на Командорских о-вах (о. Беринга) и две (Оссора и Корф) – на западном берегу Берингова моря. В период извержения вулкана Хунга-Тонга и распространения волн цунами мареографы в Семячике, Корфе и Сосуново работали со сбоями, вследствие чего в настоящем исследовании данные по этим станциям не использовались. Для сравнения были также проанализированы записи Тонга цунами, полученные на четырех зарубежных береговых станциях: Кушимото (о. Хонсю, Япония), Ханасаки (о. Хоккайдо, Япония), Мукхо (япономорское побережье Южной Кореи) и Адак (Алеутские о-ва, США). Все посты, за исключением Малокурильского, были оснащены современным автоматическим измерительным оборудованием, включающим в себя гидростатический датчик уровня моря и блок компенсации атмосферного давления. Уровень моря измерялся с дискретностью по времени 1 минута и по высоте 1 см¹.

Дополнительно для анализа были использованы записи шести глубоководных станций DART: 21413, 21415, 21416, 21418, 21419 и 21420 (рис. 1). В зависимости от станции и периода наблюдений временное разрешение этих данных составляло 15 с, 1 мин или 15 мин (в том случае, если данная станция не находилась в "тревожном режиме"). Также для станций Водопадная, Никольское, Поронайск, Углегорск, Холмск, Мукхо, Ханасаки и Кушимото были использованы записи высокочастотных колебаний атмосферного давления.

АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

Атмосферная волна Лэмба, сгенерированная извержением вулкана Хунга-Тонга, распространялась от источника со скоростью около 310 м/с. Примерно в 11:00 UTC (через 7 часов после извержения) атмосферная волна достигла Курильских о-вов, в 11:20 – южного побережья полуострова Камчатка, в 11:30 – южного берега о. Сахалин и в 11:40 – Приморского края (рис. 2а). Атмосферная волна на своем пути генерировала волну в океане, которая фактически представляет собой атмосферное (метео) цунами. Атмосферное цунами наблюдалось как на открытом побережье Тихого океана (Курильские острова и полуостров Камчатка), так и в изолированных морях, таких как Японское и Охотское [51].

Одновременно с возникновением атмосферной волны Лэмба, вследствие извержения вулкана возникла океанская волна цунами (рис. 2б), распространявшаяся по акватории Тихого океана со скоростью длинных океанских гравитационных волн $c = \sqrt{gH}$, где g — ускорение свободного падения, а *H* — глубина океана. В глубокой части (4000 м) Тихого океана эта волна имела скорость около 200 м/с, что примерно в 1.5 раза медленнее, чем атмосферная волна Лэмба. К побережью Курильских островов и Камчатского п-ва океанская волна цунами подошла через ~10-11 ч после извержения вулкана (около 15:00-15:30 UTC). На рис. 26 показано время распространения волн цунами в северо-западной части Тихого океана. Для расчета времени прихода океанских волн был использован высокоточный метод ориентации волнового фронта, предложенный в работе [23]. Этот метод основан на принципе Гюйгенса и информации об ориентации наступающего волнового фронта для расчета времени прохождения волн цунами от вулкана Хунга-Тонга до береговых мареографов и глубоководных станций DART.

На рис. 3 представлены записи изменения атмосферного давления на восьми станциях. Первая атмосферная волна Лэмба (A1) достигла рассматриваемых пунктов около 11:20-11:40 UTC. Сначала эта волна была зафиксирована на записях на станциях Водопадная (п-ов Камчатка), Никольское (о. Беринга), Ханасаки (о. Хокайдо) и Кушимото (Хонсю). До станций, расположенных на Корейском п-ове (Мукхо) и на о. Сахалин (Поронайск, Углегорск и Холмск), атмосферная волна пришла примерно на 15-30 мин позднее. Время прихода волны по данным наблюдений (рис. 3) хорошо согласуется с расчетным временем теоретического прихода волн Лэмба со скоростью 312 м/с (рис. 2а). Высота атмосферной волны от подошвы до гребня менялась в диапазоне от 1.1 гПа на станции Никольское до 2.5 гПа в Ханасаки.

¹ Подчеркнем, что при измерении цунами с дискретностью 1 мин разрешение по высоте в 1 см является недостаточным и приводит к серьезному искажению спектра регистрируемых волн. Современные международные требования, предъявляемые к подобной аппаратуре, требуют измерения уровня моря с точностью 0.1 см.

МЕДВЕДЕВ и др.

Таблица. Характеристики мареографных станций в северо-западной части Тихого океана и результаты анализа: теоретические расчеты времени (UTC, 15 января 2022 г.) прихода атмосферных волн (T_A) и океанских волн (T_O), время добегания (ч) атмосферной (t_A) и океанских (t_O) волн цунами до представленных станций, а также максимальные амплитуды (A_A и A_O) и высоты (H_A и H_O) атмосферной и океанской волн цунами

N⁰	Широта (° с.ш.)	Долгота (° в.д.)	Станция	$T_{\rm A}$	<i>t</i> _А , Ч	<i>А</i> _А , см	<i>Н</i> _А , см	To	<i>t</i> ₀ , Ч	<i>А</i> ₀ , см	<i>H</i> ₀ , см
1	33.48	135.77	Кушимото, Япония	11:18	7.06	55.1	101.9	15:03	10.81	90.7	191.2
2	43.28	145.57	Ханасаки, Япония	11:29	7.24	49.2	91.8	15:09	10.91	57.1	112.7
3	43.87	146.82	Малокурильское	11:29	7.23	59.8	130.8	15:02	10.80	51.0	120.8
4	45.24	147.83	Курильск	11:33	7.30	6.5	14.4	15:19	11.08	12.2	27.9
5	46.60	142.74	Корсаков	11:52	7.62	6.5	15.7	16:56	12.70	14.0	27.0
6	47.43	142.83	Стародубское	11:55	7.68	5.7	10.6	16:20	12.09	22.9	39.6
7	49.19	143.14	Поронайск	12:03	7.80	5.0	11.9	17:58	13.72	15.5	28.2
8	49.07	142.02	Углегорск	12:05	7.84	2.5	4.7	18:33	14.30	4.9	9.3
9	47.05	142.04	Холмск	11:56	7.69	4.0	7.8	17:50	13.59	7.1	14.0
10	48.97	140.29	Советская Гавань	12:09	7.91	3.5	8.4	18:33	14.31	5.2	10.3
11	44.35	135.80	Рудная Пристань	12:02	7.79	15.2	29.6	17:05	12.84	23.0	43.7
12	42.91	133.92	Преображение	12:02	7.79	18.6	34.0	17:02	12.80	13.0	28.0
13	42.78	132.86	Находка	12:05	7.84	2.4	9.3	17:11	12.95	4.2	11.9
14	43.13	131.92	Владивосток	12:09	7.91	7.2	16.6	18:10	13.92	10.7	21.1
15	42.65	130.80	Посьет	12:11	7.94	5.3	13.4	17:55	13.68	3.1	8.7
16	37.55	129.12	Мукхо, Южная Корея	11:58	7.72	15.9	31.0	17:53	13.64	17.5	32.6
17	51.83	158.07	Водопадная	11:46	7.52	54.5	92.5	15:11	10.95	64.6	130.2
18	52.98	158.65	Петропавловск- Камчатский	11:51	7.61	3.6	8.7	15:39	11.40	4.9	15.7
19	51.48	156.48	Озерная	11:46	7.53	3.5	10.0	16:03	11.80	8.5	14.8
20	59.25	163.06	Occopa	12:20	8.09	4.5	7.8	17:33	13.31	7.1	15.6
21	55.20	165.98	Никольское	11:54	7.66	4.6	8.2	15:28	11.22	8.4	18.9
22	51.86	176.63 ¹	Адак, США	11:24	7.16	22.8	50.2	14:56	10.69	42.2	89.8

¹ Для станции Адак указана з.д.

Обратная атмосферная волна (N1), распространявшаяся из антинодальной точки, расположенной в Африке, по записям атмосферного давления на северо-западном побережье Тихого океана трудно различима (синяя область на рис. 3). Вторая прямая атмосферная волна Лэмба (А2), обогнувшая земной шар, наблюдалась примерно в 00:00 UTC 17 января. Она также вначале была зафиксирована на камчатских и японских станциях, а уже потом — на станциях, расположенных на Корейском п-ове и на о. Сахалин, что соответствует теоретическому распространению фронта атмосферной волны (рис. 2). На японских и сахалинских станциях амплитуда второй атмосферной волны была в 2-3 раза меньше, чем у первой. В то же время на станциях Водопадная, Никольское и Мукхо амплитуда второй волны имела близкие значения к характеристикам первой волны. Вторая прямая волна пришла

примерно через 35.8 ч после первой, что соответствует скорости распространения ~311.2 м/с.

На рис. 4 показаны записи гидростатического давления на шести станциях DART: 21413, 21415, 21416, 21418, 21419 и 21420. Первая волна в записях на станииях DART. отмеченная на рис. 4 розовой полосой, представляет собой сумму скачка атмосферного давления, вызванного прохождением атмосферной волны Лэмба, и ответных колебаний уровня моря. Характер этого скачка давления по записям на станциях DART похож на форму волны Лэмба, записанную на береговых метеостанциях (рис. 3). Дисперсия колебаний давления на дне океана значительно увеличивается после прихода первой атмосферной волны. Еще одно повышение давления на дне океана было зафиксировано примерно через три часа после прохождения атмосферной волны. Оно вызвано приходом «прямой» океанской волны цунами,



Рис. 1. Расположение станций, данные которых были использованы в настоящем исследовании. Красной линией на врезке показан периметр рассматриваемого полигона, АП – автоматические посты, а красной звездочкой — вулкан Хунга-Тонга.

сформировавшейся в районе очага извержения вулкана. Их расчетное время прихода отмечено серой полосой.

На рис. 5 представлены записи колебаний уровня моря на береговых станциях, расположенных вдоль побережья Японского моря. Как было показано в работе [51], океанская волна цунами, образованная непосредственно вследствие извержения вулкана и распространявшаяся по акватории Тихого океана со скоростью длинных океанских волн, проникла в акваторию Японского моря со значительным запаздыванием относительно волны, вызванной атмосфер-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

ным возмущением, и с заметным уменьшением амплитуды. Волны цунами, зафиксированные на записях береговых мареографов в Японском море, имеют преимущественно атмосферное происхождение. Максимальная амплитуда волны цунами (A_{max}) была зарегистрирована на станции Рудная Пристань — 0.23 м, а высота (от подошвы до вершины) достигала 0.44 м. В [51] было высказано предположение, что максимум высоты (H_{max}) цунами в Рудной Пристани все же был связан с проникновением океанской волны через проливы Курильской гряды и далее через пролив Лаперуза.



Рис. 2. Карты времен распространения (а) атмосферной волны Лэмба и (б) океанской волны цунами.

На станциях Малокурильское, Ханасаки и Кушимото (рис. 6), расположенных на открытом побережье Тихого океана (см. рис. 1), можно выделить оба типа волн цунами. Сначала происходит увеличение дисперсии колебаний уровня, вызванное приходом атмосферной волны Лэмба (примерно 11:30-11:40 UTC). Своих максимальных амплитуд зарегистрированные колебания достигают примерно через 3-4 часа, когда до этих станций доходит океанская волна цунами. Максимальные амплитуда и высота волн цунами на станции Ханасаки составляли $A_{\text{max}} = 0.57$ м, $H_{\text{max}} = 1.13$ м, в Кушимото $A_{\text{max}} = 0.91$ м, $H_{\text{max}} = 1.91$ м, а в Малокурильском $A_{\text{max}} = 0.60$ м, $H_{\rm max} = 1.31$ м. На станциях, расположенных на побережье Охотского моря (Курильск, Корсаков, Стародубское и Поронайск), влияние волн цунами, сгенерированных непосредственно прохождением атмосферной волны Лэмба над близлежащей акваторией (около 11:40-12:00 UTC), на характере записей колебаний уровня моря практически не сказывается. Явное усиление происходит также через 3-4 часа, когда до этих станций доходит океанская волна цунами. Так, на станции Курильск усиление колебаний уровня моря наблюдается после 15:00 UTC, когда A_{max} достигает 0.12 м, в Поронайске и Стародубском A_{max} достигается после 22:30 UTC: 0.16 и 0.23 м соответственно.

На береговых станциях, расположенных на побережье Камчатского полуострова и Алеутских островов (рис. 7), анализ высокочастотных записей непериодических колебаний уровня моря позволяет выделить время прихода как волн цунами

атмосферного происхождения, так и океанских волн, сгенерированных непосредственно вблизи вулкана Хунга-Тонга. Так, на записях на станциях Водопадная, Адак, Петропавловск-Камчатский и Никольское после 12:00 UTC меняется характер колебаний уровня моря и наблюдается увеличение дисперсии процесса. Это связано с приходом волн цунами, сгенерированных под влиянием атмосферных волн Лэмба. В работе [51] было высказано предположение, что атмосферные волны Лэмба на пути своего распространения формируют вторичные источники цунами, откуда волны цунами распространяются как обычные длинные волны со скоростями $c = \sqrt{gH}$. Вследствие этого на записях колебаний уровня на станциях Водопадная. Адак, Петропавловск-Камчатский и Никольское видно непрерывное увеличение высоты колебаний уровня, что связано с приходом все бо́льшего количества волн цунами из этих вторичных источников, расположенных все ближе и ближе к источнику. Около 15:10-15:30 UTC до этих станций дошла прямая океанская волна, сгенерированная вблизи вулкана Хунга-Тонга. На станции Никольское $A_{\text{max}} = 0.08$ м, $H_{\text{max}} = 0.19$ м, в Адак $A_{\text{max}} = 0.42$ м, $H_{\text{max}} = 0.90$ м, а на станции Водопадная $A_{\text{max}} = 0.65$ м, $H_{\text{max}} = 1.30$ м.

Для определения генезиса аномальных колебаний уровня моря был проведен спектрально-временной анализ (СВАН) и рассчитаны частотно-временные диаграммы (рис. 8). Для СВАН-диаграмм для станций, расположенных на открытом океанском побережье (рис. 8а, б, д, е), характерно резкое увеличение энергии в диапазо-



Рис. 3. Записи атмосферного давления на станциях Дальневосточного региона. Красной полосой показаны приходы прямых атмосферных волн Лэмба, а синей — обратных волн. Пунктирной вертикальной красной линией с символом «Е» указан момент извержения вулкана Хунга-Тонга.

не периодов от 5 мин до часа, связанное с приходом атмосферной волны Лэмба. После прихода океанской волны цунами происходит увеличение энергии в узком индивидуальном частотном диапазоне. Так, на станции Водопадная усилились колебания с периодом 8–10 мин, в Адаке — с периодом 12–15 мин, в Курильске — с периодом 15–20 мин, а в Кушимото ярко выражены две полосы периодов: 10–14 мин и 20–25 мин. Преобладающий период колебаний, видимо, определялся частотно-избирательными свойствами соответствующей акватории (залива, бухты, прилегающего шельфа), в которой располагалась береговая станция. Для СВАН-диаграмм станций, расположенных внутри Японского моря (рис. 8в, г), заметны повышенные значения дисперсии



Рис. 4. Записи цунами 15 января 2022 г., вызванного извержением вулкана Хунга-Тонга, полученные на шести глубоководных станциях сети DART, положение которых показано на рис. 1. Временные ряды с шагом 15 с и 1 мин показаны синим цветом, а с шагом 15 мин — голубым цветом. Красной полосой показан приход первой волны цунами, атмосферного происхождения, серой полосой отмечен момент прихода волны цунами океанского происхождения. Сплошной вертикальной красной линией с символом «Е» показан момент извержения вулкана Хунга-Тонга.

фоновых колебаний уровня моря до прихода атмосферной и океанских волн цунами. Так, во Владивостоке наблюдаются сильные колебания в диапазоне периодов 30 мин — 1 ч (рис. 8в). После прихода атмосферной волны Лэмба усиливаются колебания с периодом около 45 мин, а после прибытия океанской волны — с периодом 30—35 мин, а также на периодах 12 и 8 мин. В Рудной Пристани до прихода волн цунами наблюдается повышенная энергия в высокочастотной области СВАН-диаграмм (рис. 8г), которая может быть вызвана инфрагравитационными волнами и влиянием ветрового волнения, что наблюдается на данной станции при прохождении тайфунов [10, 39]. После прихода атмосферной волны Лэмба происходит увеличение дисперсии в широком диапазоне частот от 1 до 20 цикл/час. После проникновения океанской волны в бассейн Японского моря на СВАН-диаграмме в Рудной Пристани заметно увеличение колебаний с периодом около 8 мин. Причем это резкое увеличение соответствует проникновению волн цунами не из Сангарского пролива (наикратчайший путь от вулкана до станции), а распространению океанской волны через проливы Курильской гряды и пролив Лаперуза, что подтверждает выводы работы [51].

На основе анализа записей колебаний уровня моря в северо-западной части Тихого океана за временной промежуток с 00:00 15 января



Рис. 5. Записи волн цунами, вызванных извержением вулкана Хунга-Тонга, полученные на побережье Японского моря. Красными стрелками отмечено расчетное время прихода первой волны цунами атмосферного происхождения, синими стрелками — расчетное время прихода волны цунами океанского происхождения. Сплошной вертикальной красной линией с символом «Е» показан момент извержения вулкана. Ступенчатый характер записей на станциях Находка, Владивосток и Посьет связан с недостаточным разрешением по высоте на соответствующих мареографах.

по 12:00 16 января были оценены максимальные амплитуды и высоты волн цунами атмосферного и океанского происхождения (таблица, рис. 9). Максимальные амплитуды/высоты волн цунами атмосферного происхождения рассчитывались для временного промежутка после расчетного времени прихода атмосферной волны Лэмба («А» на рис. 5–7) и до расчетного времени прихода океанской гравитационной волны цунами («О» на рис. 5–7). Максимальные амплитуды/высоты волны цунами, сформированной непосредственно извержением вулкана и распространявшейся от источника в виде свободной гравитационной волны, оценивались для временного промежутка от расчетного времени прихода океанской волны до 12:00 16 января. Временные промежутки для оценки высот различались в зависимости от станции (см. таблицу и рис. 5–7).

Максимальные высоты цунами как атмосферного, так и океанского происхождения наблюдаются на открытом побережье Тихого океана.

207



Рис. 6. Записи цунами, вызванного извержением вулкана Хунга-Тонга, полученные на побережьях Охотского моря, Курильских о-вов и северо-восточном побережье о. Хоккайдо. Аналоговая запись на станции Малокурильское была оцифрована с дискретностью 1 мин. Красными стрелками отмечено расчетное время прихода первой волны цунами атмосферного происхождения, синими стрелками — расчетное время прихода волны цунами океанского происхождения. Сплошной вертикальной красной линией с символом «Е» показан момент извержения вулкана Хунга-Тонга.



Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для станций, расположенных на побережьях п-ва Камчатка и Алеутских о-вов.

На станциях Кушимото, Ханасаки, Малокурильское и Водопадная высота атмосферной волны цунами составляет 90–130 см, а океанской — 113–190 см. На большинстве станций в окраинных и внутренних морях высота океанской волны также превосходит высоту волны атмосферного происхождения. Исключением являются станции Посьет и Преображение.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемая в данном исследовании северо-западная часть Тихого океана — один из самых интересных районов Мирового океана с точки зрения проявления волн цунами, вызванных извержением вулкана Хунга-Тонга. Курильские о-ва с системой узких проливов между ними, про-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

лив Лаперуза, Корейский и Сангарский проливы, соединяющие Охотское и Японское моря с Тихим океаном, неоднородная топография океанского дна и сложная форма береговой линии — все это приводит к возникновению уникальной картины отклика колебаний уровня моря на распространяющуюся волну цунами. Как было показано в работе [51], океанская волна цунами, приходящая из Тихого океана в Японское море, существенно ослаблялась при прохождении узких и мелковолных проливов. Вследствие этого, в частности. в акватории Японского моря оказалось достаточно сложно выделить океанскую волну Тонга цунами в записях уровня моря. Напротив, на открытом Тихоокеанском побережье Японии волны цунами двух типов, вызванные атмосферным воздействием и океанские, пришедшие из начального источника, хорошо выделялись.



Рис. 8. Частотно-временные (CBAH) диаграммы колебаний уровня моря с 14 по 16 января 2022 г. Вертикальной штриховой красной линией с символом «Е» показан момент извержения вулкана Хунга-Тонга. Белыми вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты прихода атмосферной волны Лэмба (символ «А») и волны цунами океанского происхождения (символ «О»).



Рис. 9. Высоты волн цунами атмосферного (красные столбики) и океанского (синие столбики) происхождения по данным береговых мареографов.

Двойственный механизм цунами (а точнее, даже тройственный, учитывая вторичные источники в открытой части Тихого океана), вызванного извержением вулкана Хунга-Тонга, создал серьезные проблемы для СПЦ, как российской, так и международной. В значительной степени эти проблемы удалось решить в результате широкой международной кооперации и оперативного обмена информацией. Однако данное конкретное событие поставило перед существующими СПЦ принципиальный вопрос: как предсказывать и осуществлять оперативное оповещение об угрозе вулканических цунами, а также других цунами несейсмического происхождения?

Вулканические цунами — явление нечастое, но практически всегда катастрофическое. Как уже отмечалось, извержение вулкана Санторин 3600 лет назад в Средиземном море существенно повлияло на минойскую цивилизацию [9, 36], взрыв вулкана Кракатау в Зондском архипелаге в 1883 г. привел к гибели 36 тыс. человек [24, 44], а извержение его «сыночка» (Anak Krakatau - «Дитя Кракатау») 22 декабря 2018 г. вызвало локальное разрушительное цунами: 437 человек погибло и еще 14059 ранено [47]. Серьезная угроза катастрофических цунамигенных извержений вулканов существует в районе Малых Антильских островов (Атлантический океан/Карибское море), в Средиземном море (вулкан Стромболи), на Алеутских островах. Одним из наиболее опасных районов с этой точки зрения является вулканическая гряда Курильских островов. Бухта Броутона в северо-западной части о. Симушир и залив Львиная Пасть на юго-западном побережье о. Итуруп — это реликты сильнейших исторических вулканических извержений [4], причем образовавшиеся в результате этих извержений волны цунами по своему масштабу должны были быть сопоставимы с цунами, вызванном взрывом вулкана Кракатау. Одним из наиболее активных вулканов Курильской гряды является вулкан Алаид на о. Атласова, который потенциально может вызвать мощнейшее вулканогенное цунами в Охотском море.

Не меньшую опасность представляют цунами оползневого происхождения. В последние годы подобным цунами уделяется повышенное внимание. Надводные и подводные оползни и связанные с ними цунами могут быть вторичным эффектом происшедших землетрясений; так, видимо, катастрофическое Палу-Сулавеси цунами 28 сентября 2018 г. (4340 погибших, 10679 раненых [47]) было связано не непосредственно с землетрясением с моментной магнитудой M_w 7.5, а с вызванным им локальным подводным оползнем в бухте Палу [47]. Однако достаточно часто оползни в прибрежной зоне возникают под действием различных гидрометеорологических факторов (например, ливневых дождей) или являются следствием аномально низких приливов [6]. В некоторых районах земного шара оползни и сопутствующие цунами происходят регулярно (Аляска, Британская Колумбия, Норвегия, Гренландия), причем заплески этих цунами порой достигают колоссальных высот (свыше 100 м). Одним из районов высокого риска оползневых цунами является восточный шельф о. Сахалин [1, 3], т.е. район активной добычи нефти и газа.

Еще одним видом опасных несейсмических волн цунами являются *метеоцунами*. До недавнего времени считалось, что это редкое и экзотическое явление, которое наблюдается только в нескольких специфических районах (Балеарские о-ва, Адриатика, Сицилия, юго-западное побережье Японии, Флорида, Великие озера [41]). Однако данные последних лет показывают, что метеоцунами возникают повсеместно, причем часто в районах, где ранее они никогда не отмечались [25, 26, 46, 53]. Так, 19 марта 2017 г. сильнейшее метеоцунами произошло в Персилском заливе: несколько человек погибло, прибрежной инфраструктуре был нанесен значительный ущерб [29]. Персидский залив, где ранее никогда подобные явления не наблюдались, — это основной мировой район нефтедобычи; цунами в этом районе может привести к экологической катастрофе. Нефтегазоносный полигон на северо-восточном шельфе Сахалина в определенном смысле является аналогом Персидского залива; метеоцунами на побережье Сахалина наблюдались в прошлом [5, 13] и, видимо, будут происходить в будущем. Оценка опасности метеоцунами для этого района и их оперативный прогноз являются важнейшей залачей.

Извержение вулкана Хунга-Тонга в некоторым смысле объединило все эти три типа несейсмических цунамигенных явлений: (1) взрыв вулкана породил вулканогенное цунами, (2) лавовые потоки, сопутствующие извержению, сгенерировали локальное оползневое цунами, а (3) атмосферные волны Лэмба, вызванные извержением, породили метеоцунами, наблюдавшиеся по всему Мировому океану и ярко проявившиеся у берегов России.

Существующие СПЦ (как российская, так и международные) в первую очередь рассчитаны на прогноз сейсмогенных цунами, вызванных подводными землетрясениями. К сожалению, в настоящее время не существует надежных методов оперативного прогноза цунами несейсмического происхождения¹. При этом три вы-

¹ Единственным исключением являются метеоцунами, для которых в некоторых странах, в частности, в Испании и Хорватии, такие методы развиваются, и соответствующая служба создается (см., например, [54]).
шеперечисленных типа несейсмических цунами (вулканогенные, оползневые и метеорологические) представляют серьезную угрозу для Дальневосточного побережья России.

Имеется еще два аспекта явления, которые следует отметить:

1. Серьезные разрушения береговой инфраструктуры, повреждения заякоренных судов, различных портовых объектов часто вызываются не непосредственно волнами пунами, а сопутствующими им сильными течениями. Так, Курильское (Симуширское) цунами 15 ноября 2006 г. привело на противоположной стороне Тихого океана к убыткам около 30 млн. долларов в порту Кресент-Сити (Калифорния) в результате экстремальных течений, сформировавшихся в этом порту под действием цунами [20]. Еще более сильный ущерб в этом и других портах Южной Калифорнии был нанесен Чилийским цунами 2010 г. и Тохоку цунами 2011 г. [55]. Разрушительные течения могут быть вызваны цунами и метеоцунами даже со сравнительно небольшими высотами, как это наблюдалось 27 июня 2003 г. в бухте Мали-Стон в Хорватии [52]. Оценки течений, выполненные в работе [28] для характерных высот метеоцунами в портах Японии, показывают, что при прохождении Хунга-Тонга цунами опасные течения со скоростями несколько узлов также могли наблюдаться в некоторых портах побережья Тихого океана.

2. Результаты анализа наблюдений, выполненного в работах [10, 28, 39], показали сугубо индивидуальную реакцию колебаний уровня океана на внешнее воздействие в отдельных портах данного региона. То же мы наблюдаем и для Хунга-Тонга цунами (см. рис. 5–7). Видимо, это объясняется различной степенью защищенности отдельных пунктов побережья, а также локальными и региональными особенностями топографии и геометрии линии берега (этот вопрос рассматривался, в частности, в работе [13]).

Все перечисленные эффекты показывают, с одной стороны, исключительную важность тщательного изучения Хунга-Тонга цунами 2022 г... а с другой — необходимость разработки надежных подходов к оперативному и долгосрочному прогнозу подобных несейсмических явлений. Сложность подобной задачи очевидна, но один аспект проблемы является несомненным: необходим постоянный высокоточный мониторинг волн цунами с хорошим разрешением по времени (≤ 1 мин) и по пространству (~100 км). Более того, крайне желательно, чтобы одновременно проводились и прецизионные измерения атмосферного давления с точностью ~0.01 гПа или лучше — подобно тому, как сейчас уже делается во многих странах мира (Канада, США, Южная Корея и др.). Такой непрерывный мониторинг позволит получить исключительно ценный научный материал, который даст возможность глубже понять физику соответствующих явлений, улучшит качество оперативного прогноза сейсмических цунами и позволит наметить пути прогноза несейсмических цунами. Очевидно также, что для надежного оперативного оповещения о цунами (как сейсмических, так и несейсмических) для побережий внутренних морей России (Охотского, Японского) необходима установка донных кабельных или автономных станций в глубоководных частях этих морей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Взрыв вулкана Хунга-Тонга 15 января 2022 г. привел к формированию широкого спектра волн в атмосфере и океане, которые были зарегистрированы тысячами высокоточных цифровых приборов, включая микробарографы, береговые мареографы и датчики придонного давления в открытых частях Мирового океана. Атмосферные волны Лэмба, образовавшиеся в результате взрыва вулкана, распространялись со скоростью ~300-320 м/с и на своем пути генерировали отклик в океане – "метеоцунами". Извержение вулкана также вызвало "океанские" волны цунами, которые распространялись непосредственно от источника со скоростью длинных волн ~200-220 м/с в глубоководной части океана.

Настоящее работа посвящена исследованию особенностей проявления данного события на Дальневосточном побережье России и в близлежащих районах (Япония, Южная Корея, США). Для анализа использованы записи береговых мареографов, глубоководных станций DART и высокоточных микробарографов. При этом особое внимание было уделено работе Российской СПЦ по обеспечению безопасности российского побережья во время этого события и взаимодействию Российской СПЦ с Международной СПЦ.

На основе анализа измерений уровня моря и флуктуаций атмосферного давления вблизи российского побережья были оценены параметры волн цунами различного происхождения, сформированных извержением вулкана Хунга-Тонга. Высота измеренной атмосферной волны Лэмба от подошвы до гребня менялась в диапазоне от 1.1 гПа на станции Никольское (Командорские о-ва) до 2.5 гПа в Ханасаки (Япония). По времени прихода были оценены высоты волн цунами атмосферного и океанского происхождения. При этом выяснилось, что на большинстве станций, как на внешнем (океанском) побережье, так и во внутренних морях, высоты "океанской" волны преобладали. Так, на станциях Кушимото, Ханасаки, Малокурильское и Водопадная высоты атмосферной волны цунами составляли 90– 130 см, а океанской — 113–190 см.

Российской СПЦ удалось успешно преодолеть проблемы, возникшие при оперативном прогнозе этого сложного явления. Использование оперативных измерений на островных и японских береговых мареографах, измерений станций системы DART в северо-западной части Тихого океана и активное взаимодействие с Международной СПЦ позволили эффективно решить задачи оперативного оповещения об угрозе волн цунами и защиты населения прибрежных районов Дальневосточного региона.

Данное событие позволило выявить и некоторые недостатки Российской СПЦ, главным из которых является отсутствие современной цифровой измерительной аппаратуры на океанской стороне Курильской гряды — районе, наиболее подверженном угрозе волн цунами. Отсутствие автоматизированных постов высокочастотных измерений колебаний уровня моря и атмосферного давления на протяженном участке Дальневосточного побережья России значительно осложняет оперативное прогнозирование опасности волн цунами для всего региона и создает серьезные проблемы для последующего исследования данного явления. Необходима установка высокоточных цифровых приборов, обеспечивающих непрерывный мониторинг волн цунами и родственных явлений вдоль всего Дальневосточного побережья России с хорошим разрешением по времени (≤ 1 мин) и по пространству (~100 км).

Существующие СПЦ, как Российская, так и мировая, в первую очередь рассчитаны на прогноз сейсмогенных цунами, вызванных подводными землетрясениями. К сожалению, в настоящее время не существует надежных методов оперативного прогноза цунами несейсмического происхождения. При этом несейсмические цунами (вулканогенные, оползневые и метеорологические) представляют серьезную угрозу для Дальневосточного побережья России. Для надежного оперативного оповещения о цунами (как сейсмических, так и несейсмических) для побережий внутренних морей России (Охотского, Японского) необходима установка донных кабельных или автономных станций в глубоководных частях этих морей.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Б.В., Лобковский Л.И., Куликов Е.А. и др. Оползни на восточном склоне о. Сахалин как источники возможных цунами // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449. № 3. С. 334–337.

- 2. Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Долгих Г.И., Долгих С.Г. Регистрация возмущений в Японском море, вызванные извержением вулкана Хунга-Тонга-Хаапай в архипелаге Тонга 15.01.2022 // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 259–264.
- 3. Иванова А.А., Куликов Е.А., Файн И.В., Баранов Б.В. Генерация цунами подводным оползнем вблизи восточного побережья о. Сахалин // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2018. № 2. С. 111–116.
- Ким Х.С., Рабинович А.Б. Цунами на северо-западном побережье Охотского моря / В Сб.: "Природные катастрофы и стихийные бедствия в Дальневосточном регионе", Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВНЦ АН СССР. 1990. Т. 1. С. 206–218.
- 5. Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Хузеева М.О. Сейши, вызываемые атмосферными возмущениями в диапазоне периодов метеоцунами, у побережья южной половины острова Сахалин // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 4. С. 437–450. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-437-450
- 6. *Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В.* и др. Генерация цунами оползнями на тихоокеанском побережье Северной Америки и роль приливов в этом процессе // Океанология. 1998. Т. 38. № 1. С. 361–367.
- 7. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
- Лобковский Л.И., Рабинович А.Б., Куликов Е.А. и др. Курильские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (наблюдения, анализ и численное моделирование) // Океанология. 2009. Т. 49. № 2. С. 181–197.
- 9. *Мурти Т.* Сейсмические морские волны цунами. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 447 с.
- Смирнова Д.А., Медведев И.П. Экстремальные колебания уровня Японского моря, вызванные прохождением тайфунов Майсак и Хайшен в сентябре 2020 г. // Океанология. 2023. Т. 63. № 5. С. 718– 732. https://doi.org/10.31857/S0030157423050179
- 11. Смышляев А. Время красной рыбы. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2003. 426 с.
- 12. Соловьев С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. М.: Наука, 1974. 310 с.
- Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. Цунами и другие опасные морские явления в портах Дальневосточного региона России (по инструментальным измерениям). Южно-Сахалинск, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2013. 44 с.
- Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н., Кайстренко В.М. Цунами 5 ноября 1952 г. в Северо-Курильске и его эхо в последующие 70 лет // Природа. 2022. № 4. С. 12-26.
- Adam D. Tonga volcano eruption created puzzling ripples in Earth's atmosphere // Nature. 2022. V. 601. № 497. https://doi.org/10.1038/d41586-022-00127-1

- Amores A., Monserrat S., Marcos M. et al. Numerical simulation of atmospheric Lamb waves generated by the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption // Geophysical Research Letters. 2022. V. 49, e2022GL098240. https://doi.org/10.1029/2022GL098240
- 17. Brenna M., Cronin S.J., Smith I.E.M. et al. Postcaldera volcanism reveals shallow priming of an intraocean arc andesitic caldera: Hunga volcano, Tonga, SW Pacific // Lithos. 2022. V. 412–413. № 106614. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106614
- Carvajal M., Sepúlveda I., Gubler A., Garreaud R. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami // Geophysical Research Letters. 2022. V. 49. № 6, e2022GL098153. https://doi. org/10.1029/2022GL098153
- Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y. et al. Individual wave propagations in ionosphere and troposphere triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai underwater volcano eruption on 15 January 2022 // Remote Sens. 2022. V. 14. Issue 9. https://doi.org/10.3390/ rs14092179
- Dengler L, Uslu B., Barberopoulou A. et al. The vulnerability of Crescent City, California, to tsunamis generated by earthquakes in the Kuril Islands region of the northwestern Pacific // Seismol. Res. Lett. 2008. V. 79. № 5. P. 608–619.
- Duncombe J. The surprising reach of Tonga's giant atmospheric waves // Eos. 2022. V. 103. https://doi. org/10.1029/2022EO220050
- 22. *Ewing M., Press F.* Tide-gage disturbances from the great eruption of Krakatoa // Transactions, American Geophysical Union. 1955. V. 36. № 1. P. 53–60.
- 23. *Fine I.V., Thomson R.E.* A wavefront orientation method for precise numerical determination of tsunami travel time // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2013. V. 13. № 11. P. 2863–2870. https://doi.org/10.5194/nhess-13-2863-2013.
- 24. *Garrett C.J.R.* A theory of the Krakatoa tide gauge disturbances // Tellus. 1970. V. 22. P. 43–52.
- Gusiakov V.K. Global occurrence of large tsunamis and tsunami-like waves within the last 120 years (1900–2019) // Pure Appl. Geophys. 2020. V. 177. P. 1261–1266. https://doi.org/10.1007/s00024-020-02437-9
- 26. Gusiakov V.K. Meteotsunamis at global scale: Problems of event identification, parameterization and cataloguing // Natural Hazards. 2021. V. 106. P. 1105–1123. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04230-2
- Harkrider D., Press F. The Krakatoa air-sea waves: An example of pulse propagation in coupled systems // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1967. V. 13. P. 149–159.
- 28. *Heidarzadeh M., Rabinovich A.B.* Combined hazard of typhoon-generated meteorological tsunamis and storm surges along the coast of Japan // Natural Hazards. 2021. V. 106. № 2. P. 1639–1672. https:// doi.org/10.1007/s11069-020-04448-0

- 29. Heidarzadeh M., Šepić J., Rabinovich A.B. et al. Meteorological tsunami of 19 March 2017 in the Persian Gulf: Observations and analyses // Pure Appl. Geophys. 2020. V. 177. № 3. P. 1231–1259. https:// doi.org/10.1007/s00024-019-02263-8
- 30. *Heinrich P., Gailler A., Dupont A. et al.* Observations and simulations of the meteotsunami generated by the Tonga eruption on 15 January 2022 in the Mediterranean Sea // Geophysical Journal International. 2023. V. 234. № 2. P. 903–914.
- Hu G., Li L., Ren Z., Zhang K. The characteristics of the 2022 Tonga volcanic tsunami in the Pacific Ocean // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2023. V. 23. P. 675–691. https://doi.org/10.5194/ nhess-23-675-2023
- 32. *Imamura F., Suppasri A., Arikawa T. et al.* Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022 // Pure Appl. Geophys. 2022. V. 179. № 5. https://doi. org/10.1007/s00024-022-030xx-x
- Kong L.S.L, Dunbar P.K., Arcos N. (Eds.), Pacific Tsunami Warning System: A Half-Century of Protecting the Pacific, 1965–2015, Honolulu, International Tsunami Information Center, 2015. 188 p.
- Kubota T., Saito T., Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption // Science. 2022. V. 377. № 6601. P. 91–94. https://doi.org/10.1126/science.abo4364
- 35. Kulichkov S.N., Chunchuzov I.P., Popov O.E. et al. Acoustic-gravity Lamb waves from the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, its energy release and impact on aerosol concentrations and tsunami // Pure Appl. Geophys. 2022. V. 179. № 5. https://doi.org/10.1007/s00024-022-03046-4
- 36. Kusky T.M. Déjà vu: Might future eruptions of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano be a repeat of the devastating eruption of Santorini, Greece (1650 BC)? // Journal of Earth Science. 2022. V. 33. № 2. P. 229– 235. https://doi.org/10.1007/s12583-022-1624-2
- 37. Lynett P., McCann M., Zhou Z. et al. Diverse tsunamigenesis triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption // Nature. 2022. V. 609. № 7928. P. 728–733. https://doi.org/10.1038/s41586-022-05170-6
- Matoza R.S., Fee D., Assink J.D. et al. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga // Science. 2022.
 V. 377. № 6601. P. 95–100. https://doi.org/10.1126/ science.abo7063
- 39. *Medvedev I.P., Rabinovich A.B., Šepić J.* Destructive coastal sea level oscillations generated by Typhoon Maysak in the Sea of Japan in September 2020 // Scientific Reports. 2022. V. 12. № 8463. https://doi. org/10.1038/s41598-022-12189-2
- 40. *Medvedeva A., Medvedev I., Fine I. et al.* Local and trans-oceanic tsunamis in the Bering and Chukchi seas based on numerical modeling // Pure Appl.

Geophys. 2023. V. 180. P. 1639–1659. https://doi. org/10.1007/s00024-023-03251-9

- 41. *Monserrat S., Vilibić I., Rabinovich A.B.* Meteotsunamis: Atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2006. V. 6. № 6. P. 1035– 1051. https://doi.org/10.5194/nhess-6-1035-2006
- 42. Omira R., Ramalho R.S., Kim J. et al. Global Tonga tsunami explained by a fast-moving atmospheric source // Nature. 2022. V. 609. № 7928. P. 734–740. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04926-4
- 43. *Pararas-Caraynnis G*. The tsunami generated from the eruption of the volcano of Santorin in the Bronze Age // Natural Hazards. 1992. V. 5. № 2. P. 115–123. https://doi.org/10.1007/BF00127000
- Pelinovsky E., Choi B.H., Stromkov A. et al. Analysis of tide-gauge records of the 1883 Krakatau tsunami / In: K. Satake (Eds.) Tsunamis: Case Studies and Recent Developments. Dordrecht, Springer, 2005. P. 57–78; https://doi.org/10.1007/1-4020-3331-1_4
- 45. *Press F., Harkrider D.* Air-sea waves from the explosion of Krakatoa // Science. 1966. V. 154. P. 1325–1327.
- 46. Rabinovich A.B. Twenty-seven years of progress in the science of meteorological tsunamis following the 1992 Daytona Beach event // Pure Appl. Geophys. 2020. V. 177. № 3. P. 1193–1230. https://doi.org/10.1007/s00024-019-02349-3
- 47. *Rabinovich A.B.* (Ed.). Two 2018 Destructive Indonesian Tsunamis: Palu (Sulawesi) and Anak Krakatau, Basel: Springer, 2022. 442 p.
- 48. Ramírez-Herrera M.T., Coca O., Vargas-Espinosa V. Tsunami effects on the coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano eruption, Tonga // Pure Appl. Geophys. 2022. V. 179. № 4. P. 1117– 1137. https://doi.org/10.1007/s00024-022-03017-9
- 49. *Tanioka Y., Yamanaka Y., Nakagaki T.* Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption // Earth, Planets and Space. 2022. V. 74. № 61. https://doi. org/10.1186/s40623-022-01614-5

- Themens D.R., Watson C., Žagar N. et al. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption // Geophysical Research Letters. 2022. V. 49. e2022GL098158. https://doi.org/10.1029/2022GL098158
- Tsukanova E., Medvedev I. The observations of the 2022 Tonga-Hunga tsunami waves in the Sea of Japan // Pure Appl. Geophys. 2022. V. 179. № 12. P. 4279–4299. https://doi.org/10.1007/s00024-022-03191-w
- 52. Vilibić I., Domijan N., Orlić M. et al. Resonant coupling of a traveling air pressure disturbance with the east Adriatic coastal waters // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2004. V. 109. № C10001. https:// doi.org/10.1029/2004JC002279
- 53. Vilibić I., Rabinovich A.B., Anderson E.J. Special issue on the global perspective on meteotsunami science: editorial // Natural Hazards. 2021. V. 106. № 2. P. 1087–1104. https://doi.org/10.1007/s11069-021-04679-9
- 54. Vilibić I., Šepić J., Rabinovich A., Monserrat S. Modern approaches in meteotsunami research and early warning // Frontiers in Marine Science. 2016. V. 3. № 57. P. 1–7. https://doi.org/10.3389/ fmars.2016.00057
- 55. Wilson R.I., Admire A.R., Borrero J.C. et al. Observations and impacts from the 2010 Chilean and 2011 Japanese tsunamis in California (USA) // Pure Appl. Geophys. 2013. V. 170. № 6–8. P. 1127–1147.
- 56. Wright C.J., Hindley N.P., Alexander M.J. et al. Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption // Nature. 2022. V. 609. P. 741–746. https://doi.org/10.1038/s41586-022-05012-5
- 57. Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E. et al. Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb waves // Frontiers in Astronomy and Space Sciences. 2022. V. 9. https:// doi.org/10.3389/fspas.2022.871275

OBSERVATIONS OF TSUNAMI WAVES ON THE PACIFIC COAST OF RUSSIA ORIGINATING FROM THE HUNGA TONGA-HUNGA HA'APAI VOLCANIC ERUPTION ON JANUARY 15, 2022

I. P. Medvedev^{a, #}, T. N. Ivelskaya^b, A. B. Rabinovich^a, E. S. Tsukanova^a and A. Yu. Medvedeva^{a, c}

 ^a Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
^b Sakhalin Tsunami Warning Center, State Institution of the Sakhalin Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
^c Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[#]e-mail: patamates@gmail.com

The Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption on January 15, 2022 generated a tsunami that affected the entire Pacific Ocean. Tsunami from the event have been generated both by incoming waves from the source area, with a long-wave speed in the ocean of $\sim 200-220$ m/s, and by an atmospheric wave propagating

МЕДВЕДЕВ и др.

at a sound speed ~315 m/s. Such a dual source mechanism created a serious problem and was a real challenge for the Pacific tsunami warning services. The work of the Russian Tsunami Warning Service (Yuzhno-Sakhalinsk) during this event is considered in detail. The tsunami was clearly recorded on the coasts of the Northwest Pacific and in the adjacent marginal seas, including the Sea of Japan, the Sea of Okhotsk and the Bering Sea. We examined high-resolution records (1-min sampling) of 20 tide gauges and 8 air pressure stations in this region for the period of January 14–17, 2022. On the Russian coast, the highest waves, with a trough-to-crest wave height of 1.3 m, were recorded at Malokurilskoe (Shikotan Island) and Vodopadnaya (the southeastern coast of Kamchatka). Using numerical simulation and data analysis methods, we were able to separate the oceanic "gravity" tsunami waves from propagating atmospheric pressure waves. In general, we found that on the outer (oceanic) coasts and the southern coast of the Sea of Okhotsk, oceanic tsunami waves prevailed, while on the coast of the Sea of Japan, oceanic and atmospheric tsunami waves had similar heights.

Keywords: tsunami, Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano, Pacific Ocean, Lamb waves, Sea of Okhotsk, Sea of Japan, Tsunami Warning Service, volcanic eruption

—— ХИМИЯ МОРЯ —

УДК 550.465

СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В РАСТВОРЕННОЙ И ВЗВЕШЕННОЙ ФОРМАХ В ВОДАХ КАРСКОГО МОРЯ

© 2024 г. Н. А. Беляев*, В. Ю. Федулов, М. Д. Кравчишина, С. А. Щука

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

*e-mail: ratnick@mail.ru Поступила в редакцию 18.05.23 г. После доработки 16.08.23 г. Принята к публикации 16.11.23 г.

Обобщены данные по содержанию взвешенного вещества, концентрациям растворенного и взвешенного органического углерода в водах Карского моря за 2007–2022 гг. Выявлено различие распределений растворенного (DOC) и взвешенного (POC) органического углерода в толще вод в осенний (сентябрь), и весенне-летний (июль-август) периоды. Зафиксировано повышение концентраций растворенного органического углерода как на поверхности, так и в толще вод в летний период. Анализ зависимостей концентраций DOC от солености показал, что возрастание данных концентраций не связано с увеличением концентраций DOC в водах речного стока. Также отмечено существенное увеличение концентраций DOC и POC в зонах цветения фитопланктона по всему столбу воды. Таким образом, выявлена связь между сезонными увеличениями концентраций органического вещества в открытой части моря и процессами цветения фитопланктона.

Ключевые слова: растворенный органический углерод, взвешенный органический углерод, взвешенное вещество, Карское море, Арктика

DOI: 10.31857/S0030157424020038 EDN: RWITBI

Исследование содержания взвешенного вещества, взвешенного и растворенного органического углерода в водной толще является критически важным для понимания функционирования морских экосистем. Изменение их концентраций в морской среде зависит от множества биологических и геологических факторов, главными из которых являются биопродуктивность экосистемы и поставки материала с суши [12]. В полярных регионах к данным факторам добавляется ярко выраженная внутри- и межсезонная климатическая изменчивость [22].

Активное исследование арктических экосистем и Карского моря в частности началось в последнее десятилетие XX века. В ряде обобщающих работ выделены основные тенденции распределения как взвешенного вещества, так и органического углерода в морях Российской Арктики [13, 24]. Большой объем данных об их содержании и распределении был получен в ходе выполнения исследований по программе "Экосистемы морей Сибирской Арктики" в 2007–2022 гг. [19]. Полученные результаты частично были опубликованы в ряде более ранних работ [1, 2, 7, 14, 18, 26], частично были задействованы для интерпретации материалов комплексных исследований [6, 11, 19–21]. При этом полный массив полученного материала никогда ранее не публиковался и не интерпретировался. Данная работа пытается устранить этот пробел.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные о содержании взвешенного вещества (PM), содержании общего (TOC), растворенного (DOC) и взвешенного (POC) органического углерода были получены в ходе выполнения исследований по программе "Экосистемы морей Сибирской Арктики" в 2007–2022 гг. Работы проводились с бортов НИС "Академик Мстислав Келдыш" (АМК54 – 2007 г., АМК59 – 2011 г., АМК66 – 2016 г., АМК76 – 2019 г., АМК81 – 2020 г., АМК83 – 2021 г., АМК89-2 – 2022 г.), НИС "Профессор Штокман" (ПШ128, ПШ129 – 2014 г.) и ДЭ "Норильский Никель" (НН16 – 2016 г., НН17 – 2017 г., НН18 – 2018 г.). Места отбора проб представлены на карте (рис. 1).

Пробы воды отбирали преимущественно батометрами Нискина емкостью 5 и 10 л в ходе гидрологических зондирований. В экспедициях НН16-18, а также на ряде станций пробы воды поверхностного слоя отбирали пластиковым ведром. Для определения содержания общего ор-



Рис. 1. Карта отбора проб в Карском море.

ганического углерода (ТОС) пробы отбирали непосредственно из батометров в 22 мл стеклянные виалы, в остальных случаях — в предварительно подготовленные пластиковые канистры. Для

определения содержания минеральной взвеси (ВВ) использовались лавсановые ядерные фильтры размером пор 0.45 мкм (Дубна). Пробы воды (3 повторности с горизонта, средний объем 4 л)

фильтровали под вакуумом (0.4 атм) через предварительно подготовленные и взвешенные фильтры. Фильтры промывали деионизированной водой, помещали в пластиковые чашки Петри и высушивали в сушильном шкафу при температуре не более 50°С. Для анализа содержания взвешенного (POC) и растворенного (DOC) органического углерода фильтрация производилась через предварительно прокаленные (при t = 430°С) фильтры Whatman GF/F с условным диаметром пор 0.7 мкм самотеком. Для определения содержания DOC фильтрованная вода из-под GF/F фильтра отбиралась в стеклянные виалы емкостью 22 мл. Пробы для анализа ТОС и DOC немедленно подкисляли соляной кислотой до рН 2 и хранили в холодильнике до проведения анализов. Части фильтров, предназначенные для определения взвешенного углерода, высушивали при температуре 50°С.

Анализ содержания органического и карбонатного углерода проводили на приборах серии Shimadzu TOC [1]. Сущность метода, положенного в основу прибора, заключается в каталитическом окислении содержащихся в пробе соединений углерода при температуре от 550 до 1000°С в присутствии кислородсодержащего газа до СО₂ и последующем определении выделившегося СО₂ с использованием инфракрасного детектора. Калибровочный диапазон для определения содержания общего и растворенного углерода составлял 0.5–20 мгС/л, взвешенного 1–1000 мкгС. Погрешность измерений составляла 5% отн. В экспедициях 2007-2018 гг. определение содержания углерода проводили в стационарной лаборатории, с 2019 г. — на борту судна. Для анализа общего и растворенного органического углерода использовали основной блок прибора, определение взвешенного углерода проводили с помощью приставки SSM 5000А. При определении углерода во взвеси анализировали содержание общего и карбонатного углерода в образце, содержание органического рассчитывали по разнице концентраций.

Содержание взвеси определяли гравиметрическим методом в стационарной лаборатории. Для парных измерений взвешенного вещества и взвешенного органического углерода была выполнена оценка относительного содержания органического вещества во взвеси. Данные расчетные величины не являются точно измеренными, так как для фильтрации воды использовались разные типы фильтров (лавсановые и стекловолокнистые) с разным диаметром пор и, следовательно, с разной фильтрующей способностью по отношению ко взвешенному веществу в морской воде. Данная проблема является общей методической и не имеет общего решения на данный момент в практике океанологических

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

исследований. При этом полученные величины являются важным маркером состава и происхождения взвешенного вещества.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные представлены в таблицах 1 и 2. В табл. 1 приводятся также координаты станций, даты, глубины, значения температуры и солености, полученные при гидрофизических зондированиях во время отбора проб. Данные измерений, полученные в рейсах АМК54, АМК59, НН16 и НН17, были опубликованы ранее [1, 2, 14, 18, 26], остальные результаты полностью не публиковались.

До начала комплексных исследований по программе "Экосистемы морей Сибирской Арктики" было показано, что поведение органического вещества в морях Российской Арктики большей частью определяется поставкой его с суши с водами речного стока и последующим распределением его по акватории моря [3, 13, 22-24]. Первоначальные исследования в рамках программы в целом подтверждали данные предположения [1, 2]. Однако обобщение полученного за годы исследований материала показало возможное наличие других механизмов, оказывающих влияние на цикл углерода в бассейне Карского моря. Цикл углерода, как и другие биогеохимические циклы, определяется множеством климатических параметров, главными из которых для Карского моря являются вариации поступления пресных вод с речным стоком и время освобождения акватории моря от ледового покрова. С водами речного стока в Карское море поступает основная масса аллохтонного органического вещества [13, 17, 24], а освобождение вод ото льда стимулирует фотосинтетические процессы [4, 9] и начало продуцирования автохтонного ОВ. При этом для обоих процессов характерна высокая межгодовая изменчивость, не совпадающая по времени друг с другом. Сход льда определяется местными климатическими условиями, время пика паводка зависит от условий в бассейне водосбора. Из составленной по материалам баз данных [10, 25] таблицы 3, где приведены времена максимума паводков и процентов плошади открытой воды, следует, что межгодовые колебания времени схода льда превышают 1.5 месяца, а пика паводка — 1 месяц. Исходя из этого, при анализе полученных данных учитывались не только календарная дата, но и сложившаяся ледовая и гидрологическая обстановка. Выявленная существенная межгодовая и внутрисезонная изменчивость концентраций органического вещества во многом определяется балансом данных факторов.

БЕЛЯЕВ и др.

ВИ	ии	, М	М	а	e e	Дата	°C	, %	ц	ц/
пида	анц	30HT	ина,	Toq	ILOT	TIT	-pa,	OCTH	, ML	, MI
кспе	lē cT	зиdo	луб	Ши	Дол	4M.I	емп	нэц	00	200
Ð	4	Ľ	Ц			дд.	Ē	CC		Π
AMK54	4946	0	160	72.000	61.000	09.09.2007	6.17	28.00		2.17
AMK54	4946	20	160	72.000	61.000	09.09.2007	6.42	32.10		1.99
AMK54	4946	30	160	72.000	61.000	09.09.2007	-0.03	33.20		1.38
AMK54	4946	70	160	72.000	61.000	09.09.2007	-1.23	34.20		1.14
AMK54	4946	138	160	72.000	61.000	09.09.2007	-1.33	34.50		1.13
AMK54	4950	0	115	71.683	63.005	10.09.2007	5.46	22.40		3.15
AMK54	4950	30	115	71.683	63.005	10.09.2007	-1.37	33.40		1.45
AMK54	4950	50	115	71.683	63.005	10.09.2007	-0.83	33.80		1.35
AMK54	4950	71	115	71.683	63.005	10.09.2007	-1.21	34.10		1.31
AMK54	4950	113	115	71.683	63.005	10.09.2007	-1.21	34.50		1.23
	40.5.4	2	17	71.120	(((17	11.00.2007	5.01	22.40		1.50
AMK54	4954	2	15	71.130	66.617	11.09.2007	5.31	33.40		1.59
AMK54	4954	14	15	/1.130	66.617	11.09.2007	5.24	33.40		1.62
AMK54	4956	0	35	71.250	65.837	11.09.2007	5.74	30.90		1.27
AMK54	4956	14	35	71.250	65.837	11.09.2007	5.71	32.26		1.34
AMK54	4956	21	35	71.250	65.837	11.09.2007	4.98	32.90		1.59
AMK54	4956	25	35	71.250	65.837	11.09.2007	4.30	33.10		2.26
AMK54	4956	32	35	71.250	65.837	11.09.2007	4.25	33.20		1.23
A NAV 54	4059	0	110	71 227	(5.250	11.00.2007	1 55	28.00		1 21
AMK54	4938	0 15	110	71.327	65.250	11.09.2007	4.33	28.90		1.21
AMK54	4938	15	110	71.327	65 250	11.09.2007	2.72	33.10 22.70		1.24
AMK 54	4938	20 55	110	71.327	65 250	11.09.2007	-0.39	33.70 34.00		1.30
AMK 54	4958	110	110	71.327	65 250	11.09.2007	-0.85	34.00		1.10
AMIXJT	т <i>)</i> 50	110	110	/1.527	05.250	11.09.2007	-1.25	54.40		1.23
AMK54	4960	0	116	71.408	64.847	11.09.2007	4.25	27.80		2.47
AMK54	4960	18	116	71.408	64.847	11.09.2007	-1.56	33.30		1.29
AMK54	4960	29	116	71.408	64.847	11.09.2007	-1.65	33.50		1.32
AMK54	4960	60	116	71.408	64.847	11.09.2007	-0.63	34.20		1.13
AMK54	4960	109	116	71.408	64.847	11.09.2007	-1.17	34.50		1.22
A M K 54	4983	0	555	76 937	70 338	23 09 2007	2 31	34 20		1 59
AMK54	4983	10	555	76.937	70.338	23.09.2007	2.07	34.30		1.13
AMK 54	4983	20	555	76.937	70.338	23.09.2007	2.06	34.30		1.04
AMK54	4983	40	555	76.937	70.338	23.09.2007	1.50	34.40		1.03
AMK54	4983	62	555	76.937	70.338	23.09.2007	0.20	34.60		0.94
AMK54	4983	200	555	76.937	70.338	23.09.2007	-0.48	34.80		0.84

Таблица 1. Температура, соленость, концентрации общего (ТОС) и растворенного (DOC) органического углерода в Карском море

ви	ИИ	W,	W	æ	I	Дата	ç	%,	ц	ц/
едиц	ганц	I30HT	бина,	ирота	JIFOT	LTT	I-pa,	ность	C, MI,	C, ML
Эксп	No	Lop	Глу	Ξ	Дс	I.MM.	Темі	Соле	TO	DO
	1000					Ê		•		
AMK54	4983	528	555	76.937	70.338	23.09.2007	0.20	34.90		1.10
AMK54	4984	0	564	77.052	70.017	23.09.2007	2.23	34.10		1.15
AMK54	4984	10	564	77.052	70.017	23.09.2007	2.14	34.40		1.21
AMK54	4984	75	564	77.052	70.017	23.09.2007	1.16	34.60		1.25
AMK54	4988	0	183	76.548	71.363	24.09.2007	2.55	33.90		1.54
AMK54	4988	20	183	76.548	71.363	24.09.2007	2.14	34.00		1.31
AMK54	4988	30	183	76.548	71.363	24.09.2007	2.25	34.00		1.78
AMK54	4988	37	183	76.548	71.363	24.09.2007	1.73	34.10		1.49
AMK54	4988	60	183	76.548	71.363	24.09.2007	-0.40	34.40		1.40
AMK54	4988	102	183	76.548	71.363	24.09.2007	0.68	34.60		1.46
AMK54	4988	178	183	76.548	71.363	24.09.2007	0.22	34.80		1.49
A NAV 54	4000	0	120	76 000	72 099	24.00.2007	1 72	26.20		2.02
AMK54	4990	0	129	76.223	72.988	24.09.2007	1./3	20.20		3.03 2.49
AMK54	4990	0	129	76.225	72.988	24.09.2007	-0.98	32.00 21.70		2.48
AMK54	4990	10	129	76.223	72.988	24.09.2007	-1.1/	31.70		1.00
AMK54	4990	20	129	/6.223	/2.988	24.09.2007	-1.55	33.40		2.00
AMK54	4990	50	129	76.223	72.988	24.09.2007	-1.02	34.10		2.04
AMK54	4990	75	129	76.223	72.988	24.09.2007	-0.93	34.20		1.47
AMK54	4990	107	129	76.223	72.988	24.09.2007	-0.90	34.30		1.44
AMK54	4993	0	21	71.248	72.855	27.09.2007	7.72	0.20		11.94
AMK54	4993	21	21	71.248	72.855	27.09.2007	7.21	0.00		12.03
A MV 54	4004	0	16	71 722	72 700	27.00.2007	6.02	0.60		0.00
AMK54	4994	15	10	71.733	72.790	27.09.2007	6.05	0.00		9.09
AMKJ4	4994	15	10	/1./55	72.790	27.09.2007	0.03	0.70		9.55
AMK54	4996	0	17	72.902	73.569	28.09.2007	4.01	6.00		6.92
AMK54	4996	2	17	72.902	73.569	28.09.2007	3.26	13.50		3.88
AMK54	4996	15	17	72.902	73.569	28.09.2007	2.24	24.40		3.52
AMK54	4999	0	27	72.952	73.285	28.09.2007	3.06	9.30		7.46
AMK54	4999	6	27	72.952	73.285	28.09.2007	3.06	21.20		3.79
AMK54	4999	24	27	72.952	73.285	28.09.2007	-0.09	29.50		2.65
		·		, • _				_,		
AMK54	5000	0	24	73.750	72.945	29.09.2007	3.46	19.80		4.05
AMK54	5000	16	24	73.750	72.945	29.09.2007	-0.88	30.90		2.13
AMK54	5000	22	24	73.750	72.945	29.09.2007	-0.80	32.10		2.70
AMK54	5001	0	25	74.588	72.760	29.09.2007	2.74	20.60		4.99

ВИ	ИИ	, М	М	T		Дата	°C	, %	ц	ц
Экспедиц	№ станци	Горизонт,	Глубина,	Широта	Долгота	дд.мм.гггг	Темп-ра,	Соленость	TOC, MI/	DOC, MI
AMK54	5001	12	25	74.588	72.760	29.09.2007	-0.66	27.70		4.18
AMK54	5001	22	25	74.588	72.760	29.09.2007	-1.18	31.90		2.96
AMK54	5002	0	29	75.168	72.608	29.09.2007	2.83	18.95		4.97
AMK54	5002	14	29	75.168	72.608	29.09.2007	-1.08	29.50		2.85
AMK54	5002	25	29	75.168	72.608	29.09.2007	-1.15	32.30		2.94
AMK54	5003	0	60	75.440	72.523	29.09.2007	2.74	19.10		4.71
AMK54	5003	10	60	75.440	72.523	29.09.2007	-0.65	29.00		3.68
AMK54	5003	14	60	75.440	72.523	29.09.2007	-1.16	32.50		1.88
AMK54	5004	0	110	75.553	72.522	29.09.2007	2.68	18.60		4.03
AMK54	5004	15	110	75.553	72.522	29.09.2007	-1.07	32.00		1.25
AMK54	5004	40	110	75.553	72.522	29.09.2007	-1.40	33.60		1.91
AMK54	5004	103	110	75.553	72.522	29.09.2007	-0.96	34.10		1.05
AMK59	5010	0	29	74.283	78.618	17.09.2011	4.80	26.24		4.94
AMK59	5010	5	29	74.283	78.618	17.09.2011	4.82	26.27		5.81
AMK59	5010	10	29	74.283	78.618	17.09.2011	4.52	26.30		3.23
AMK59	5010	20	29	74.283	78.618	17.09.2011	-1.17	31.18		2.28
AMK59	5010	28	29	74.283	78.618	17.09.2011	-1.41	32.12		2.06
AMK59	5011-2	0	36	73.557	79.790	19.09.2011	6.09	13.60		4.72
AMK59	5011-2	12	36	73.557	79.790	19.09.2011	1.19	29.65		2.39
AMK59	5011-2	25	36	73.557	79.790	19.09.2011	-0.34	31.32		3.42
AMK59	5011-2	34	36	73.557	79.790	19.09.2011	-1.23	32.44		2.12
AMK59	5013	0	30	71.827	82.992	18.09.2011	9.61	0.08		7.85
AMK59	5013	28	30	71.827	82.992	18.09.2011	9.52	0.07		7.95
AMK59	5014	2	10	71.867	82.200	19.09.2011	9.23	0.05		7.96
AMK59	5015	0	14	72.167	80.998	19.09.2011	8.76	0.46		10.78
AMK59	5015	12	14	72.167	80.998	19.09.2011	4.43	21.03		4.69
AMK59 AMK59 AMK59 AMK59	5018 5018 5018 5018	0 6 14 20	22 22 22 22	72.817 72.817 72.817 72.817	79.998 79.998 79.998 79.998	19.09.2011 19.09.2011 19.09.2011	5.03 3.86 2.20 0.33	15.78 24.93 28.32 31.05		5.11 3.27 4.77 3.25
AMK59	5021	32	34	73.398	79.830	19.09.2011	-0.63	31.54		1.91

Таблица 1. Продолжение

ви	ИИ	W	М	e e	_	Дата	ç	%	ц	ц/
Экспедиц	№ станці	Горизонт,	Глубина,	Широт	Долгота	дд.ММ.ГГГГ	Темп-ра,	Соленость	TOC, MI/	DOC, MI,
AMK 59	5023	2	29	73.017	78,898	21.09.2011	4.99	16.52		4.55
AMK 59	5023	5	29	73.017	78,898	21.09.2011	4.35	24.96		4.59
AMK59	5023	22	29	73.017	78.898	21.09.2011	-1.41	31.89		2.74
AMK59	5023	27	29	73.017	78.898	21.09.2011	-1.37	32.11		4.49
AMK59	5025	0	47	75.585	77.168	22.09.2011	5.46	22.93		3.36
AMK59	5025	45	47	75.585	77.168	22.09.2011	-1.56	33.51		1.33
AMK59	5026	2	62	76.000	76.667	22.09.2011	5.62	24.16		3.24
AMK59	5026	6	62	76.000	76.667	22.09.2011	5.64	25.30		2.88
AMK59	5026	20	62	76.000	76.667	22.09.2011	1.48	32.85		1.77
AMK59	5026	60	62	76.000	76.667	22.09.2011	-1.36	33.99		1.11
AMK59	5028	1	40	75.178	86.668	23.09.2011	3.90	18.20		3.98
AMK59	5028	8	40	75.178	86.668	23.09.2011	3.46	21.52		3.92
AMK59	5028	20	40	75.178	86.668	23.09.2011	0.81	31.84		2.21
AMK59	5028	38	40	75.178	86.668	23.09.2011	-1.43	33.38		1.55
AMK59	5029	2	54	75.365	85.352	23.09.2011	3.75	29.10		2.36
AMK59	5029	8	54	75.365	85.352	23.09.2011	3.80	29.23		1.96
AMK59	5029	51	54	75.365	85.352	23.09.2011	-1.49	33.72		1.29
AMK59	5030	1	41	75.322	85.638	24.09.2011	2.86	25.46		3.33
AMK59	5030	3	41	75.322	85.638	24.09.2011	3.72	28.19		5.02
AMK59	5030	14	41	75.322	85.638	24.09.2011	2.36	30.64		2.61
AMK59	5030	38	41	75.322	85.638	24.09.2011	-1.51	33.54		3.06
AMK59	5032	2	59	76.550	80.750	24.09.2011	4.05	28.65		2.24
AMK59	5032	16	59	76.550	80.750	24.09.2011	1.30	32.93		1.12
AMK59	5032	40	59	76.550	80.750	24.09.2011	-1.68	33.74		4.71
AMK59	5032	56	59	76.550	80.750	24.09.2011	-1.40	34.04		7.64
AMK59	5033	3	122	77.208	78.127	25.09.2011	4.52	27.26		2.48
AMK59	5033	10	122	77.208	78.127	25.09.2011	4.86	27.56		2.79
AMK59	5033	120	122	77.208	78.127	25.09.2011	-1.11	34.40		1.23
AMK59	5039	1	361	78.000	74.868	26.09.2011	3.36	31.57		2.54
AMK59	5039	20	361	78.000	74.868	26.09.2011	2.86	34.35		2.29
AMK59	5039	150	361	78.000	74.868	26.09.2011	-0.59	34.84		3.62
AMK59	5039	355	361	78.000	74.868	26.09.2011	-0.29	34.94		1.26

ВИ	ИИ	W	М	в	e.	Дата	ç	, %	ц	ц/
Экспедиц	№ станці	Горизонт	Глубина,	Широт	Долгота	дд.мм.гггг	Темп-ра,	Соленость	TOC, MI,	DOC, ML
A MIZ 50	50.42	1	165	79.450	74 000	26.00.2011	2.95	22.22		2 ()
AMK59	5042		405	78.450	74.808	26.09.2011	2.85	32.22		3.62
AMK 59	5042	25	405	78.450	74.808	26.09.2011	3.82	33.20 24.29		3.95 2.91
AMK 50	5042	33 100	403	78.430	74.808	26.09.2011	0.13	34.38 24.97		2.81
AMK 50	5042	280	403	78.450	74.000	20.09.2011	1.55	24.07 24.95		5.04
AMK59 AMK59	5042 5042	460	465	78.450	74.808 74.808	26.09.2011	-0.80	34.83 34.94		3.25
A MK 59	5044	1	150	76 540	71 645	28.09.2011	3 /1	33.16		2.80
$\Delta MK 59$	5044	110	150	76.540	71.645	28.09.2011	2.08	34 64		1 31
AMK 59	5044	147	150	76 540	71.645	28.09.2011	-0.32	34.87		0.77
AMK 59	5045	7	530.5	76.967	70.000	29.09.2011	3.76	33.62		1.05
AMK 59	5045	20	530.5	76.967	70.000	29.09.2011	3.56	34.28		1.05
AMK 59	5045	100	530.5	76 967	70.000	29.09.2011	1 4 4	34.86		1.15
AMK59	5045	528	530.5	76.967	70.000	29.09.2011	-0.49	34.94		1.40
	0010			101901	101000		0119	0 119 1		
ПШ128	12804	0	154	71.753	65.762	11.08.2014	5.21	25.88		6.23
ПШ128	12804	8	154	71.753	65.762	11.08.2014	5.22	26.10		5.87
ПШ128	12804	30	154	71.753	65.762	11.08.2014	-1.57	33.57		4.85
ПШ128	12804	80	154	71.753	65.762	11.08.2014	-0.73	34.37		0.91
ПШ128	12804	152	154	71.753	65.762	11.08.2014	-1.36	34.77		4.67
										< 1 -
ПШ128	12805	0	105	72.417	65.467	12.08.2014	6.76	23.66		6.47
ПШ128	12805	3	105	72.417	65.467	12.08.2014	6.77	23.65		7.12
ПШ128	12805	20	105	/2.41/	65.467	12.08.2014	-0.38	33.35		4.58
ПШ128	12805	35	105	/2.41/	65.467	12.08.2014	-1./3	33.62		4.32
ПШ128	12805	/5	105	/2.41/	65.467	12.08.2014	-0.85	34.33		4.47
ПШ128	12805	102	105	/2.41/	65.467	12.08.2014	-1.07	34.45		4.27
ПШ128	12807	0	64	73.337	65.667	13.08.2014	6.44	11.69		8.28
ПШ128	12807	4	64	73.337	65.667	13.08.2014	6.20	11.87		6.80
ПШ128	12807	12	64	73.337	65.667	13.08.2014	5.43	28.87		7.77
ПШ128	12807	20	64	73.337	65.667	13.08.2014	-0.50	33.13		4.08
ПШ128	12807	60	64	73.337	65.667	13.08.2014	-1.20	34.09		5.14
ПШ128	12809	0	61	74.705	64.900	15.08.2014	6.06	26.85		5.22
ПШ128	12809	8	61	74.705	64.900	15.08.2014	3.38	29.14		3.04
ПШ128	12809	17	61	74.705	64.900	15.08.2014	-1.38	33.25		3.72
ПШ128	12809	55	61	74.705	64.900	15.08.2014	-0.86	33.92		2.71

ви	ии	, М	М	G	r	Дата	°C	, %	ц/	ц/
Экспедиц	№ станці	Горизонт	Глубина,	Широта	Долгота	ДД.ММ.ГГГГ	Темп-ра,	Соленость	TOC, MI	DOC, MF,
ПШ128	12811	0	363	75.385	64.302	16.08.2014	2.34	32.05		3.49
ПШ128	12811	7	363	75.385	64.302	16.08.2014	2.39	32.04		2.25
ПШ128	12811	30	363	75.385	64.302	16.08.2014	-0.45	33.07		1.89
ПШ128	12811	75	363	75.385	64.302	16.08.2014	-1.19	34.06		3.46
ПШ128	12811	95	363	75.385	64.302	16.08.2014	-0.32	34.34		2.47
ПШ128	12811	346	363	75.385	64.302	16.08.2014	-0.74	34.73		3.14
ПШ128	12816	0	34	75.000	72.943	18.08.2014	2.35	27.11		3.12
ПШ128	12816	15	34	75.000	72.943	18.08.2014	1.37	29.34		3.09
ПШ128	12816	30	34	75.000	72.943	18.08.2014	-1.34	32.37		3.82
ПШ128	12818	0	14	72.125	73.188	19.08.2014	5.88	0.11		5.49
ПШ128	12818	14	14	72.125	73.188	19.08.2014	6.02	0.06		7.62
ПШ128	12820	0	18	72.572	73.698	20.08.2014	5.25	1.98		8.61
ПШ128	12820	10	18	72.572	73.698	20.08.2014	5.21	2.02		5.69
ПШ128	12820	16	18	72.572	73.698	20.08.2014	-0.16	2.31		8.35
ПШ128	12824	0	29.9	73.267	72.957	21.08.2014	5.31	9.85		8.31
ПШ128	12824	10	29.9	73.267	72.957	21.08.2014	4.40	15.42		7.99
ПШ128	12824	27	29.9	73.267	72.957	21.08.2014	-1.19	33.28		4.58
ПШ128	12826	0	14	72.505	80.336	22.08.2014	8.16	1.70		7.20
ПШ128	12826	12	14	72.505	80.336	22.08.2014	6.53	1.81		8.54
ПШ128	12832	0	50	75.888	89.508	23.08.2014	0.59	20.85		5.34
ПШ128	12832	12	50	75.888	89.508	23.08.2014	0.48	26.17		7.14
ПШ128	12832	48	50	75.888	89.508	23.08.2014	-1.38	33.74		3.25
ПШ128	12833	0	50	76,455	87,225	24.08.2014	1.11	28.60		2.34
ПШ128	12833	12	50	76.455	87.225	24.08.2014	1.08	28.61		2.46
ПШ128	12833	46	50	76.455	87.225	24.08.2014	-1.35	34.08		2.53
ПШ128	12835	0	140	77 201	85 450	25.08.2014	1 04	31 24		1.66
ПШ128	12835	23	140	77 201	85 450	25.08.2014	-1 20	33.45		4 48
ПШ128	12835	134	140	77.201	85.450	25.08.2014	-1.08	34.22		2.30
ПШ128	12841	0	222	78 367	76 617	25 08 2014	1 47	32 90		2 20
ПШ120	12841	17	222	78 367	76 617	25.00.2014	1 44	32.90		3 10
ПШ120	12841	33	222	78 367	76 617	25.08.2014	-0.88	34 40		1 86
ПШ128	12841	120	222	78.367	76.617	25.08.2014	-1.30	34.79		2.26

ви	ИИ	, M	М	æ	I	Дата	°C	%,	ц	ц/
Экспедиц	№ станці	Горизонт,	Глубина,	Широта	Долгота	дд.мм.гггг	Темп-ра,	Соленость	TOC, MI/	DOC, MI,
ПШ128	12841	208	222	78.367	76.617	25.08.2014	-0.95	34.88		2.93
ПШ128	12844	38	477	79.317	73.117	27.08.2014	-0.84	34.49		3.65
ПШ128	12854	0	111	75.560	63.648	31.08.2014	3.22	31.40		3.17
ПШ128	12854	18	111	75.560	63.648	31.08.2014	0.16	33.61		3.38
ПШ128	12854	109	111	75.560	63.648	31.08.2014	-0.98	34.46		2.47
ПШ128	12871	0	236	71.125	58.298	07.09.2014	4.76	30.73		2.22
ПШ128	12871	10	236	71.125	58.298	07.09.2014	4.76	30.76		2.29
ПШ128	12871	35	236	71.125	58.298	07.09.2014	0.80	33.95		3.12
ПШ128	12871	140	236	71.125	58.298	07.09.2014	-1.28	34.50		3.29
ПШ128	12871	234	236	71.125	58.298	07.09.2014	-0.97	34.68		3.54
ПШ-129	1	0	184	70.384	63.436	20.09.2014	5.59	29.41		2.25
ПШ-129	1	12	184	70.384	63.436	20.09.2014	5.10	29.42		2.10
ПШ-129	1	30	184	70.384	63.436	20.09.2014	0.08	33.43		0.89
ПШ-129	1	90	184	70.384	63.436	20.09.2014	-0.80	34.24		1.74
ПШ-129	1	177	184	70.384	63.436	20.09.2014	-1.05	34.51		1.69
ПШ-129	3	0	30	70.383	65.309	21.09.2014	4.75	26.84		2.24
ПШ-129	3	12	30	70.383	65.309	21.09.2014		26.88		2.17
ПШ-129	3	30	30	70.383	65.309	21.09.2014	0.62	32.70		3.26
ПШ-129	4	0	10	70.383	66.480	22.09.2014	2.87	30.11		2.29
ПШ-129	4	10	10	70.383	66.480	22.09.2014	3.20	30.31		1.60
ПШ-129	8	0	154	70.580	64.009	21.09.2014	4.71	26.87		3.21
ПШ-129	8	15	154	70.580	64.009	21.09.2014		29.46		3.98
ПШ-129	8	50	154	70.580	64.009	21.09.2014		33.86		1.64
ПШ-129	8	100	154	70.580	64.009	21.09.2014		34.13		2.13
ПШ-129	8	154	154	70.580	64.009	21.09.2014	-1.52	34.34		1.85
ПШ-129	12	0	22	70.783	65.371	21.09.2014	4.80	27.05		2.97
ПШ-129	12	10	22	70.783	65.371	21.09.2014		27.05		4.49
ПШ-129	12	20	22	70.783	65.371	21.09.2014	1.76	31.11		1.39
ПШ-129	13	0	10	70.783	66.258	22.09.2014	1.93	31.29		2.60
ПШ-129	13	10	10	70.783	66.258	22.09.2014	1.91	31.30		1.98
ПШ-129	13	10	10	70.783	66.258	22.09.2014		31.30		3.11

Таблица 1. Продолжение

ИЯ	ИИ	W	W	e e	_	Дата	°C	%	ц	ц/
Экспедиц	№ станці	Горизонт,	Глубина,	Широта	Долгота	дд.MM.FIFF	Темп-ра,	Соленость	TOC, MI/	DOC, MI,
ПШ-129	14	0	123	70.934	64.125	22.09.2014	4.76	28.61		2.79
ПШ-129	14	8	123	70.934	64.125	22.09.2014		28.88		0.91
ПШ-129	14	50	123	70.934	64.125	22.09.2014		33.98		2.16
ПШ-129	14	123	123	70.934	64.125	22.09.2014	-1.63	34.28		2.48
ПШ-129	17	0	135	71.050	64.616	22.09.2014	4.47	26.53		2.01
ПШ-129	17	10	135	71.050	64.616	22.09.2014		27.17		2.57
ПШ-129	17	76	135	71.050	64.616	22.09.2014	-0.30	33.37		1.39
ПШ-129	17	135	135	71.050	64.616	22.09.2014				1.95
ПШ-129	19	0	135	71.200	62.998	24.09.2014	3.86	27.35		1.98
ПШ-129	19	10	135	71.200	62.998	24.09.2014		27.77		2.89
ПШ-129	19	135	135	71.200	62.998	24.09.2014	-1.31	34.48		2.47
ПШ-129	22	0	40	71.200	65.518	23.09.2014	4.62	26.35		3.07
ПШ-129	22	12	40	71.200	65.518	23.09.2014		26.77		2.80
ПШ-129	22	40	40	71.200	65.518	23.09.2014	0.45	31.89		1.97
ПШ-129	25	0	9	71.375	66.755	23.09.2014	3.52	27.80		2.44
ПШ-129	25	9	9	71.375	66.755	23.09.2014	3.60	27.98		1.96
ПШ-129	27	0	135	71.375	65.193	23.09.2014	4.50	27.18		1.51
ПШ-129	27	12	135	71.375	65.193	23.09.2014		29.66		2.23
ПШ-129	27	40	135	71.375	65.193	23.09.2014		33.79		1.21
ПШ-129	28	0	101	71.375	63.915	24.09.2014	3.83	28.39		1.78
ПШ-129	28	15	101	71.375	63.915	24.09.2014		33.18		3.18
ПШ-129	28	25	101	71.375	63.915	24.09.2014		33.67		1.94
ПШ-129	28	101	101	71.375	63.915	24.09.2014	-1.11	34.50		0.53
ПШ-129	29	0	122	71.375	62.999	26.09.2014	3.92	26.72		2.23
ПШ-129	33	0	142	71.564	65.840	24.09.2014	4.11	26.77		2.67
ПШ-129	33	10	142	71.564	65.840	24.09.2014		26.85		2.82
ПШ-129	33	15	142	71.564	65.840	24.09.2014		30.15		1.95
ПШ-129	33	50	142	71.564	65.840	24.09.2014		33.80		1.42
ПШ-129	33	142	142	71.564	65.840	24.09.2014	-1.22	34.66		2.36
ПШ-129	35	0	19	71.554	67.147	23.09.2014	3.66	27.44		2.00
ПШ-129	35	18	19	71.554	67.147	23.09.2014	2.16	32.07		2.29

227

ВИ	ИИ	М	М	T	_	Дата	ç	%	ц	ц/
ДИЦ	анці	THO	лна,	poTa	TOT	LIT	-pa,	OCTE	, MI/	, ML
спе	ē cTâ	еид	пубі	Ши	Дол	I.I.	-IIW	лен	QC	0C
Эĸ	Ž	Гс	Ē			дд.м	Te	C	E	Д
ПШ-129	38	0	161	71.717	65.194	25.09.2014	2.91	26.46		2.67
ПШ-129	38	10	161	71.717	65.194	25.09.2014		27.59		2.50
ПШ-129	38	20	161	71.717	65.194	25.09.2014		33.05		2.20
ПШ-129	38	30	161	71.717	65.194	25.09.2014		33.48		1.59
ПШ-129	38	161	161	71.717	65.194	25.09.2014	-1.34	34.76		3.19
ПШ-129	43	0	125	71.868	62.400	26.09.2014	3.89	27.64		2.93
ПШ-129	43	40	125	71.868	62.400	26.09.2014	-1.46	33.86		2.22
ПШ-129	43	123	125	71.868	62.400	26.09.2014	-1.10	34.49		2.46
H III 120	45	0	120	71.0(7	(115)	25.00.2014	2.04	22.16		2.42
ПШ-129	45	0	129	/1.86/	64.156	25.09.2014	3.04	23.16		3.43
ПШ-129	45	15	129	/1.86/	64.156	25.09.2014		30.67		1.95
ПШ-129	45	80	129	/1.86/	64.156	25.09.2014	1 1 1	34.38		1.44
ПШ-129	45	128	129	/1.86/	64.156	25.09.2014	-1.11	34.51		2.67
ПШ-129	48	0	140	71.867	66.551	24.09.2014	4.21	28.31		1.94
ПШ-129	48	10	140	71.867	66.551	24.09.2014		29.16		2.55
ПШ-129	48	140	140	71.867	66.551	24.09.2014	-1.24	34.67		3.14
ПШ-129	50	0	154	72.075	65.189	27.09.2014	2.85	23.88		3.45
ПШ-129	50	10	154	72.075	65,189	27.09.2014		29.05		2.11
ПШ-129	50	154	154	72.075	65.189	27.09.2014	-1.18	34.58		3.48
ПШ-129	53	0	103	72.075	62.998	27.09.2014	3.37	24.23		3.25
ПШ-129	53	10	103	72.075	62.998	27.09.2014		24.46		3.78
ПШ-129	53	103	103	72.075	62.998	27.09.2014	-1.04	34.50		2.98
ПШ-129	57	0	110	72,309	64.975	28.09.2014	3.09	23.39		3.89
ПШ-129	57	10	110	72.309	64.975	28.09.2014	3.08	24.55		2.69
ПШ-129	57	15	110	72.309	64.975	28.09.2014	5.25	31.71		1.82
ПШ-129	57	30	110	72.309	64.975	28.09.2014	-1.67	33.55		2.21
ПШ-129	57	110	110	72.309	64.975	28.09.2014	-1.07	34.44		1.99
ПШ-129	59	0	126	72.309	66.559	28.09.2014	2.90	25.98		3.23
ПШ-129	59	15	126	72.309	66.559	28.09.2014		31.44		1.94
ПШ-129	59	30	126	72.309	66.559	28.09.2014		33.61		1.24
ПШ-129	59	80	126	72.309	66.559	28.09.2014		34.31		2.07
ПШ-129	59	125	126	72.309	66.559	28.09.2014	-1.16	34.49		1.23
ПШ-129	61	0	81	72.521	67.101	27.09.2014	3.17	28.63		2.37
ПШ-129	61	15	81	72.521	67.101	27.09.2014		29.50		2.01

ви	ИИ	, M	M	G	T	Дата	°C	, %	ц	ц/
Экспедиц	№ станці	Горизонт	Глубина,	Широта	Долгота	дд.ММ.ГГГГ	Темп-ра,	Соленость	TOC, MI	DOC, MI,
ПШ-129	61	81	81	72.521	67.101	27.09.2014	-1.49	34.15		1.88
ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129	66 66 66	0 10 52	86 86 86	72.310 72.310 72.310	64.019 64.019 64.019	28.09.2014 28.09.2014 28.09.2014	3.37	25.59 26.85 33.84		3.94 1.69 2.16
ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129	69 69 69 69 69	0 15 30 60 85	85 85 85 85 85	72.681 72.681 72.681 72.681 72.681	65.169 65.169 65.169 65.169 65.169	29.09.2014 29.09.2014 29.09.2014 29.09.2014 29.09.2014	3.54 4.31 -1.26 -0.91 -1.25	24.79 32.20 33.46 34.18 34.30		3.63 2.12 2.64 2.55 2.64
ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129	70 70 70 70 70	0 8 20 40 83	84 84 84 84 84	72.681 72.681 72.681 72.681 72.681	65.735 65.735 65.735 65.735 65.735	29.09.2014 29.09.2014 29.09.2014 29.09.2014 29.09.2014	3.19 3.19 -0.66 -1.51 -1.39	23.38 23.38 33.40 33.89 34.22		3.79 3.25 2.14 1.58 2.70
ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129	73 73 73 73	0 15 30 97	97 97 97 97	72.841 72.841 72.841 72.841 72.841	67.102 67.102 67.102 67.102	30.09.2014 30.09.2014 30.09.2014 30.09.2014	2.81 3.84 0.43 -1.42	26.06 29.29 33.29 33.86		2.68 2.55 1.18 2.46
ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129	74 74 74 74 74	0 8 15 40 73	73 73 73 73 73 73	72.859 72.859 72.859 72.859 72.859 72.859	66.124 66.124 66.124 66.124 66.124	29.09.2014 29.09.2014 29.09.2014 29.09.2014 29.09.2014	2.96 2.94 1.38 -1.52 -1.54	21.50 22.60 32.60 33.85 34.02		4.02 3.79 1.82 1.90 1.37
ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129	75 75 75 75 75	0 5 12 25 75	76 76 76 76 76	72.900 72.900 72.900 72.900 72.900 72.900	63.832 63.832 63.832 63.832 63.832	30.09.2014 30.09.2014 30.09.2014 30.09.2014 30.09.2014	4.14 4.16 4.61 -0.29 -1.15	28.20 28.24 30.68 33.20 34.01		4.40 2.98 3.30 2.15 3.30
ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129 ПШ-129	76 76 76 80	0 5 50 0	51 51 51 58	72.884 72.884 72.884 73.090	64.629 64.629 64.629 66.818	30.09.2014 30.09.2014 30.09.2014 30.09.2014	3.50 3.52 -1.37 3.02	23.43 23.57 33.78 19.69		5.97 4.91 4.18 4.62

ви	ИИ	Ň	W			Дата	°C	%,	ц	ц/
едиц	ганці	30HT	бина,	ирота	ЛГОТЕ	LITT	I-pa,	HOCTE	C, MI,	C, MF,
Эксп	Nº CJ	Гори	Глу6	Ē	До	.MM.	Темг	Солен	TOC	DOO
						ПЦ		0		
ПШ-129	80	6	58	73.090	66.818	30.09.2014	3.00	19.81		3.50
ПШ-129	81	0	68	73.091	66.141	30.09.2014	3.02	19.19		4.43
ПШ-129	81	7	68	73.091	66.141	30.09.2014	3.02	19.30		4.73
ПШ-129	81	12	68	73.091	66.141	30.09.2014	2.12	30.70		2.65
ПШ-129	81	68	68	73.091	66.141	30.09.2014	-1.46	34.00		2.04
ПШ-129	82	0	108	73.090	65.301	30.09.2014	3.11	18.76		4.60
ПШ-129	82	10	108	73.090	65.301	30.09.2014	3.36	21.73		3.09
ПШ-129	81	105	108	73.090	65.301	30.09.2014	-0.75	34.28		3.83
ПШ-129	84	0	44	73 090	64 017	30 09 2014	3 43	23 10		5 65
ПШ-129	84	11	44	73.090	64.017	30.09.2014	4.49	28.82		5.08
ПШ-129	84	40	44	73.090	64.017	30.09.2014	-1.59	33.66		5.52
	0.				0.0017	0010912011	,			0.02
ПШ-129	85	8	149	73.213	64.982	02.10.2014	2.53	19.19		4.33
ПШ-129	85	20	149	73.213	64.982	02.10.2014	3.94	33.16		4.40
ПШ-129	85	149	149	73.213	64.982	02.10.2014	-0.97	34.33		1.62
ПШ-129	86	0	61	73.230	65.832	02.10.2014	2.57	19.55		5.37
ПШ-129	86	0	61	73.230	65.832	02.10.2014				5.29
ПШ-129	86	0	61	73.230	65.832	02.10.2014				3.77
ПШ-129	86	60	61	73.230	65.832	02.10.2014	-1.38	34.15		4.70
ПШ-129	87	0	60	73.230	67.052	01.10.2014	2.63	25.00		2.98
ПШ-129	87	6	60	73.230	67.052	01.10.2014	2.64	25.01		2.75
ПШ-129	87	12	60	73.230	67.052	01.10.2014	2.64	28.12		2.17
ПШ-129	87	59	60	73.230	67.052	01.10.2014	-1.34	34.02		4.91
ПШ-129	88	0	36	73.463	67.746	01.10.2014	2.71	26.58		4.29
ПШ-129	88	12	36	73.463	67.746	01.10.2014	2.87	27.06		2.71
ПШ-129	88	35	36	73.463	67.746	01.10.2014	-0.27	33.12		3.82
ПШ-129	90	0	61	73,379	66.384	01.10 2014	2.71	19 18		4.59
ПШ-129	90	5	61	73 379	66 384	01 10 2014	2.71	19.10		5.82
ПШ-129	90	61	61	73 379	66 384	01.10 2014	-1 42	34.03		3 28
	20			10.017	00.001	01.10.2017	1.12	51.05		5.20
ПШ-129	92	0	125	73.380	64.965	02.10.2014	2.69	18.37		6.17
ПШ-129	92	9	125	73.380	64.965	02.10.2014		18.38		5.83
ПШ-129	92	125	125	73.380	64.965	02.10.2014	-1.06	34.26		3.58

230

ви	ИИ	W	M	T	-	Дата	ç	%	ц,	Ц/
ДИЦ	анці	CHO	ина,	рота	LOT	LLL	-pa,	ость	, MI/	, ML
спе	ē CT	еидо	лубı	Ши	Дол	IM.F	-IIWa	лен	OC	0C
Ð	Z	L	Ц			дд.М	Ĕ	Co	L	
ПШ-129	93	0	93	73.380	64.299	02.10.2014	2.64	19.20		4.39
ПШ-129	93	7	93	73.380	64.299	02.10.2014	2.64	19.20		3.96
ПШ-129	94	0	102	73.573	64.491	02.10.2014	2.75	18.75		4.89
ПШ-129	94	7	102	73.573	64.491	02.10.2014	2.75	18.73		4.21
ПШ-129	94	102	102	73.573	64.491	02.10.2014	-0.69	34.33		1.77
	5202	0	07	72 102	(1.210	16.07.2016	10.00	22.00		7.04
AMK00	5302		8/	/3.102	61.318	10.07.2010	10.00	32.90		/.04
AMK00	5302	20	87	73.102	01.318	17.07.2010	0.81	33.30		0.38
	5202	55 70	8/ 97	73.102	01.318 61.219	10.07.2016	-1.09	33.80 24.21		0.04
AMV66	5202	0	07	73.102	61 210	19.07.2010	-0.19	24.31		6.12
AMV66	5204	0	07 102	73.102	01.310	20.07.2010	-0.24	22.22	5.05	0.12
AMV66	5204	17	192	74.703	66 592	17.07.2010	0.78	32.25	5.05	4.00
AMK66	5304 5204	17	192	74.703	66 582	17.07.2010	-1.12	52.40 22.64	3.02	4.20
AMK66	5204	120	192	74.703	66 582	17.07.2010	-1.55	24.20	4.74	4.72
AMV66	5204	120	192	74.703	66 592	17.07.2010	-0.20	24.29	4.20	5.54 1.97
AWIK00	3304	109	192	/4./83	00.383	17.07.2010	-0.20	34.37	4.62	4.62
AMK66	5306	0	148	76.348	72.180	17.07.2016	5.24	31.96	2.11	2.08
AMK66	5306	15	148	76.348	72.180	17.07.2016	0.90	31.96	1.60	1.88
AMK66	5306	31	148	76.348	72.180	17.07.2016	0.23	33.32	1.77	
AMK66	5306	60	148	76.348	72.180	17.07.2016	0.96	34.05	1.81	
AMK66	5306	135	148	76.348	72.180	17.07.2016	0.70	34.48	2.90	1.58
AMK66	5306	146	148	76.348	72.180	17.07.2016	0.68	34.48	1.77	1.45
AMK66	5308	0	215	75,557	72,497	19.07.2016	8.36	31.27	5.91	5.33
AMK66	5308	35	215	75.557	72.497	19.07.2016	-1.59	33.54	6.11	5.72
AMK66	5308	80	215	75.557	72.497	19.07.2016	-0.98	34.05	6.20	5.42
AMK66	5308	165	215	75.557	72.497	19.07.2016	-0.66	34.20	6.42	4.66
AMK66	5308	207	215	75.557	72.497	19.07.2016	-0.56	34.20	5.74	4.37
A MV()	5200	0	22	75 195	72 (59	10.07.2016	12.06	22 (7	10.05	0.04
AMKG	5200	12	22	75.105	72.030	19.07.2010	13.90	25.07	10.95	0.0 4
	5200	12	32	75.185	72.038	19.07.2010	-1.07	30.87	/.00	0.03
AIVIN00	3309	50	32	/3.183	/2.038	19.07.2016	-1.33	32.70	0.38	0.00
AMK66	5310	0	28	74.647	72.778	19.07.2016	12.86	6.78	14.43	13.05
AMK66	5310	12	28	74.647	72.778	19.07.2016	3.00	30.71	8.38	6.50
AMK66	5310	28	28	74.647	72.778	19.07.2016	-1.55	33.08	8.19	6.77
AMK66	<u>5</u> 311	0	27	74.748	72.745	19.07.2016	14.03	16.57	10.85	5.71

ви	ИК	, W	W			Дата	ç	%,	ц	ц/
Экспедиц	№ станці	Горизонт	Глубина,	Широта	Долгота	дд.мм.гггг	Темп-ра,	Соленость	ТОС, мг/	DOC, MF
AMK66 AMK66	5311 5311	16 25	27 27	74.748 74.748	72.745 72.745	19.07.2016 19.07.2016	-1.43 -1.55	31.43 33.06	7.96 1.71	5.72 8.14
AMK66	5313	0	28	74.178	72.993	20.07.2016	12.28	6.99	15.74	13.17
AMK66	5313	13	28	74.178	72.993	20.07.2016	-0.60	29.50	10.74	7.91
AMK66	5313	26	28	74.178	72.993	20.07.2016	-1.55	32.80	7.81	8.12
AMK66	5315	0	28	73.655	73.000	20.07.2016	13.40	5.09	12.81	12.52
AMK66	5315	25	28	73.655	73.000	20.07.2016	-1.38	31.40	7.11	5.61
AMK66	5320	0	14	72.433	73.970	21.07.2016	14.07	1.24	14.43	13.55
AMK66	5320	10	14	72.433	73.970	21.07.2016	-0.28	27.28	8.31	7.94
AMK66	5323	0	18	71.687	72.952	21.07.2016	10.71	0.18	12.60	12.81
AMK66	5323	16	18	71.687	72.952	21.07.2016	1.19	19.48	13.01	13.34
AMK66	5324	0	16	71.472	72.558	21.07.2016		0.17		13.03
AMK66	5324	15	16	71.472	72.558	21.07.2016	9.64	0.17		12.89
AMK66	5323-2	0	18	71.687	72.952	21.07.2016	9.92	0.19	12.10	9.13
AMK66	5323-2	16	18	71.687	72.952	21.07.2016	1.05	24.48	12.91	10.62
AMK66	5321-2	0	13	72.230	73.402	21.07.2016	11.40	0.48	11.96	11.45
AMK66	5321-2	11	13	72.230	73.402	21.07.2016	1.17	22.41	9.24	7.78
AMK66	5319-2	0	21	72.673	73.772	22.07.2016	10.12	0.55	13.33	7.22
AMK66	5319-2	19	21	72.673	73.772	22.07.2016	-1.34	30.59	7.84	6.76
AMK66	5327	0	12	72.773	74.498	22.07.2016	9.99	2.10	14.46	8.96
AMK66	5327	12	12	72.773	74.498	22.07.2016	-1.09	30.73	8.44	5.80
AMK66	5318-2	0	26	72.917	73.583	23.07.2016	10.27	0.90	12.56	11.32
AMK66	5318-2	7	26	72.917	73.583	23.07.2016	-1.18	30.07	9.50	10.59
AMK66	5318-2	18	26	72.917	73.583	23.07.2016	-1.39	31.05	7.10	7.03
AMK66	5315-2	0	28	73.655	73.000	23.07.2016	11.91	5.09	12.81	12.52
AMK66	5315-2	25	28	73.655	73.000	23.07.2016	-1.17	31.40	7.11	5.61
AMK66	5330-2	0	17	73.080	73.448	23.07.2016	12.17	3.67	14.50	11.90
AMK66	5330-2	16	17	73.080	73.448	23.07.2016	-1.36	31.21	8.04	5.85

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

232

паолица п	продол									
B1	И	М	м			Дата	C	%	Е	.5
ήΠи	ИШ	HT,	Ha,	ота	ота	Ļ	a, °	CTb,	MIT/5	MI/
ІГДІ	тан	130	бин	ире		. LTT	d-u	ЮН	C.	Ū
KCI	S S	īdo	UIJ		й	MM	См	оле	D	DO
Φ						дд.	E	Ŭ	_	
AMK66	5343	9	11	72.093	81.482	25.07.2016	6.01	20.90	7.54	
AMK66	5345	0	21	71.840	82.900	25.07.2016	17.48	0.43	8.85	8.80
AMK66	5345	19	21	71.840	82.900	25.07.2016	6.28	21.40	5.01	4.80
AMK66	5344_2	0	10	71.867	82.200	26.07.2016	16.60	0.66	9.83	9.53
AMK66	5344_2	8	10	71.867	82.200	26.07.2016	15.95	1.42	9.98	9.77
AMK66	5342 2	0	14	72 207	80.833	26.07.2016	15 52	0.87	14 16	12 67
AMK66	5342 2	10	14	72 207	80.833	26.07.2016	-0.13	27.70	8.87	8 38
/ 10/1000		10	11	12.201	00.055	20.07.2010	0.15	21.10	0.07	0.50
AMK66	5340-2	0	13	72.597	80.423	26.07.2016	12.58	6.00	11.22	10.98
AMK66	5340-2	9	13	72.597	80.423	26.07.2016	3.95	21.60	9.05	6.72
AMK66	5340-2	13	13	72.597	80.423	26.07.2016	-0.50	27.90	8.57	8.17
AMK66	5339_2	0	23	72.817	79.998	27.07.2016	12.73	5.37	11.70	11.32
AMK66	5339_2	9	23	72.817	79.998	27.07.2016	-0.98	27.40	9.29	8.12
AMK66	5339_2	21	23	72.817	79.998	27.07.2016	-1.46	31.00	9.33	7.39
AMK66	5337_2	0	32	73.308	79.847	27.07.2016	11.20	7.70	7.84	7.46
AMK66	5337_2	11	32	73.308	79.847	27.07.2016	0.82	22.83	9.62	8.02
AMK66	5337_2	28	32	73.308	79.847	27.07.2016	-1.49	31.97	8.23	6.84
AMK66	5335_2	0	33	73.765	79.602	27.07.2016	11.52	7.36	7.84	7.33
AMK66	5335_2	10	33	73.765	79.602	27.07.2016	-0.37	25.61	5.88	8.12
AMK66	5335_2	29	33	73.765	79.602	27.07.2016	-1.46	31.72	7.40	7.00
AMK66	5333_2	0	31	74.252	79.000	27.07.2016	11.06	7.36	8.80	8.65
AMK66	5333_2	6	31	74.252	79.000	27.07.2016	7.74	12.35	7.97	8.64
AMK66	5333_2	28	31	74.252	79.000	27.07.2016	-1.37	30.99	6.05	6.84
	5250	0	22	74.0(7	70 422	20.07.201(11.00	0.00	11.57	10.00
AMK66	5350	0	23	/4.86/	/8.433	28.07.2016	11.60	9.00	11.5/	10.98
AMK66	5350	10	23	74.867	78.433	28.07.2016	11.11	13.40	11.28	9.65
AMK66	5350	18	23	74.867	78.433	28.07.2016	-1.31	28.80	7.06	6.26
AMK66	5351	0	43	75.203	78.352	28.07.2016	11.06	14.20	10.74	10.96
AMK66	5351	12	43	75.203	78.352	28.07.2016	0.93	30.70	8.35	6.75
AMK66	5351	40	43	75.203	78.352	28.07.2016	-1.52	32.50	7.79	5.21
A MK 66	5252	0	40	75 202	78 209	28 07 2016	6 57	18 60	10.47	11.40
	5252	5	40	75 202	70.000	20.07.2010	6.27	10.00	7 10	5 5 4
AWIN00	5552	3	40	13.282	/0.308	20.07.2010	0.22	30.70	/.19	5.34

ви	ИИ	, М	М	r T	T	Дата	°C	%	ц	ц/
цид	анц	ТНО	ина,	рот	TOT	III	-pa,	OCTH	, ML	, MI
спе	ē CT8	еидо	тубі	Ши	Дол	IM.F	-IIW	лен	QC	
Эĸ	Ž	Гс	С			ДД.М	Te	Co	E	
AMK66	5352	38	40	75.282	78.308	28.07.2016	-1.44	33.10	5.51	5.17
AMV66	5252	0	66	75 017	78 567	28 07 2016	2 74	21.40	2 70	2 52
AMK66	5353	20	66	75.917	78.507	28.07.2010	-1.07	32 50	2.70	2.33
AMK66	5353	20 48	66	75 917	78.567	28.07.2010	-1.07	33.40	3 36	1 94
AMK66	5353	60	66	75 917	78 567	28.07.2016	-0.95	33.70	3.18	2.03
11111100	5555	00	00	13.911	10.501	20.07.2010	0.95	55.10	5.10	2.05
AMK66	5306_2	0	150	76.350	72.183	29.07.2016	2.85	31.97	6.05	5.48
AMK66	5306_2	35	150	76.350	72.183	29.07.2016	-1.41	33.60	5.57	3.88
AMK66	5306_2	80	150	76.350	72.183	29.07.2016	0.34	34.30	5.26	4.46
AMK66	5306_2	148	150	76.350	72.183	29.07.2016	0.04	34.46	5.12	5.59
					-					
AMK66	5357	0	242	75.935	68.247	30.07.2016	3.64	32.41	3.30	0.74
AMK66	5357	58	242	75.935	68.247	30.07.2016	-0.34	33.99	2.31	3.85
AMK66	5357	80	242	75.935	68.247	30.07.2016	0.02	34.28	3.62	3.49
AMK66	5357	242	242	75.935	68.247	30.07.2016	0.01	34.66	3.49	1.92
4 MK 66	5358	0	350	75 385	64 313	30.07.2016	5 22	32 91	1 93	1 39
AMK66	5358	20	350	75.385	64 313	30.07.2016	3.67	33.07	1.55	1.57
AMK66	5358	20 40	350	75.385	64 313	30.07.2016	-1 20	33.94	1.00	1.37
AMK66	5358	60	350	75.385	64 313	30.07.2016	0.10	34.25	1.91	1.12
AMK66	5358	290	350	75.385	64 313	30.07.2016	-0.91	34.68	1.50	0.98
AMK66	5358	345	350	75 385	64 313	30.07.2016	-0.86	34 71	1.33	1.06
/ 10/1000	5550	515	550	15.505	01.515	50.07.2010	0.00	51.71	1.15	1.00
AMK66	5356_2	4	174	76.583	71.277	05.08.2016	4.27	34.17	1.73	1.53
AMK66	5356_2	27	174	76.583	71.277	05.08.2016	4.15	34.23	1.47	1.52
AMK66	5356_2	60	174	76.583	71.277	05.08.2016	3.95	34.42	1.39	1.55
AMK66	5356_2	162	174	76.583	71.277	05.08.2016	0.91	34.88		1.28
		_		- 4						
AMK66	5354_2	0	179	76.450	71.617	05.08.2016	3.44	33.72	1.87	1.36
AMK66	5354_2	30	179	76.450	71.617	05.08.2016	3.49	33.94	2.15	1.52
AMK66	5354_2	80	179	76.450	71.617	05.08.2016	1.05	34.57	1.82	1.45
AMK66	5354_2	174	179	76.450	71.617	05.08.2016	0.79	34.85	1.57	1.38
AMK66	5304 2	0	203	74,783	66.585	06.08 2016	5.72	32.20	2.13	1.56
AMK66	5304 2	18	203	74,783	66.585	06.08.2016	4.57	32.40	3.45	1.62
AMK66	5304 2	110	203	74,783	66.585	06.08.2016	-0.17	34.29	1.36	1.28
AMK66	5304 2	194	203	74.783	66.585	06.08.2016	-0.06	34.37	1.41	1.40
AMK66	5380	0	117	74.622	60.168	08.08.2016	5.80	31.62	1.98	1.86

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

234

ВИ	ИІ	М	М	_		Дата	C	%,	5	ц,
Пида	анци	30HT,	йнна,	ирота	лгота	LIT	I-pa, '	ность	C, MI/	C, MI,
Эксп	Nº c1	Гори	Глуб	III	До	I.MM.]	Темг	Солен	TOC	DOG
	5000	20	117	74 (22	(0.1(0	Ê	0.00		2.40	2.00
AMK66	5380	28	117	74.622	60.168	08.08.2016	-0.29	33.84	2.48	2.09
AMK66	5380	117	117	74.622	60.168	08.08.2016	-0.72	34.47	1.85	1.98
AMK66	5391	0	120	74.183	59.160	11.08.2016	6.37	31.54	2.31	1.88
AMK66	5391	14	120	74.183	59.160	11.08.2016	5.34	32.68	2.38	2.19
AMK66	5391	114	120	74.183	59.160	11.08.2016	-0.72	34.42	2.32	1.97
AMK66	5392	0	313	74.142	60.260	11.08.2016	9.18	33.14	1.56	1.58
AMK66	5392	35	313	74.142	60.260	11.08.2016	-0.88	34.05	1.89	1.46
AMK66	5392	130	313	74.142	60.260	11.08.2016	-0.42	34.52	1.50	1.20
AMK66	5392	310	313	74.142	60.260	11.08.2016	-0.89	34.67	1.61	1.52
	5402	0	210	70.002	59 205	16 00 2016	10.70	21.04	2.01	2 10
AMK00	5403	0	218	70.883	58.295	16.08.2016	10.79	31.84	3.91	2.10
AMK00	5403	12	218	70.883	58.295	16.08.2016	7.96	32.88	2.6/	2.06
AMK66	5403	32	218	/0.883	58.295	16.08.2016	2.09	33.70	1.92	1./9
AMK66	5403	65	218	/0.883	58.295	16.08.2016	0.94	34.34	2.25	2.23
AMK66	5403	90 210	218	70.883	58.295	16.08.2016	0.27	34.39	2.24	1.54
AMK66	5403	210	218	70.883	58.295	16.08.2016	-0.97	34.61	1.97	1.49
HH16	16-01	0	154	70.852	59.518	29.03.2016		33.70		3.77
HH16	16-02	0	118	71.941	63.796	29.03.2016		33.46		3.96
HH16	16-03	0	77	73.176	65.668	29.03.2016		28.10		4.04
HH16	16-04	0	21	73.789	72.793	30.03.2016		31.06		5.11
HH16	16-07	0	10	73.451	77.197	30.03.2016		30.42		3.90
HH16	16-08	0	4	72.271	80.579	30.03.2016		6.77		4.63
HH16	16-14	0	2	72.080	82.143	06.04.2016		1.82		4.41
HH16	16-16	0	4	72.526	79.853	06.04.2016		24.28		4.21
HH16	16-19	0	17	73.693	76.149	06.04.2016		31.26		4.63
HH16	16-20	0	21	73.929	73.735	06.04.2016		31.67		3.00
HH16	16-21	0	16	73.737	71.555	07.04.2016				3.87
HH16	16-22	0	14	73.290	69.457	07.04.2016		35.34		2.77
HH16	16-23	0	20	72.363	68.347	07.04.2016		35.43		2.70
HH16	16-24	0	19	71.559	67.094	07.04.2016		34.84		2.67
HH16	16-26	0	137	70.743	61.606	08.04.2016				1.93
HH16	16-27	0	52	70.464	57.961	08.04.2016		34.54		2.00
HH17	17-01	0	26	70 511	58 241	28 02 2017	_1 40			1 0.8
HH17	17_03	0	20 72	71 202	61 165	28.02.2017	-1. 1 .0	31.00		1.00
нн17	17-05	0	06	71.292	64 102	28.02.2017	-1.00	32.60		1.27
нн17	17-00	0	01	72.061	67 / 20	28.02.2017	-1.00	20 20		1.10
HH17	17-09	0	11	73.657	70.278	01.03.2017	-1.90	27.90		1.10

RI	И	W	W			Дата	ç	%	Б	щ
ЦИИД	т	онт,	іна,	рота	гота	L	pa, '	OCTb	, MI/	, MF/
спе,	ста	риз	iy 6t	Шиј	ТоГ	M.FI	-ШМ	тенс	0C	OC
Эĸ	Ž	Го	Ľ	_	7	M.A.	Te	CoJ	F	D
HH17	17-10	0	14	73.817	74.373	01.03.2017	-1.80	30.70		2.43
HH17	17-11	0	12	73.305	78.081	01.03.2017	-1.50	28.20		2.64
HH17	17-12	0	6	72.701	78.574	01.03.2017	-0.70	16.30		3.22
HH17	17-13	0	20	73.888	71.809	09.03.2017	-1.90	31.80		1.51
HH17	17-14	0	95	71.340	63.740	10.03.2017	-1.60	29.80		1.29
HH17	17-18	0	119	70.878	60.274	10.03.2017	-1.60	31.80		1.30
HH18	18-02	0	37	70 499	58 147	29.06.2018	1 20	33 42		1 42
HH18	18-03	0	131	70.827	60.080	29.06.2018	-0.70	27.12		1.12
HH18	18-04	0	194	70.869	62.501	29.06.2018	-1.00	26.93		2.35
HH18	18-05	0	104	70.925	64.296	29.06.2018	1.60	30.41		1.66
HH18	18-06	0	31	71.792	67.680	29.06.2018	2.10	31.92		2.11
HH18	18-07	0	27	73.016	68.461	30.06.2018	1.90	32.23		2.38
HH18	18-08	0	12	73.736	70.823	30.06.2018	1.40	30.22		3.94
HH18	18-09	0	21	73.888	73.573	30.06.2018	3.90	15.48		7.93
HH18	18-10	0	20	73.879	76.060	30.06.2018	3.20	14.00		5.87
HH18	18-11	0	17	73.542	78.060	30.06.2018	5.10	4.90		11.46
HH18	18-12	0	6	73.001	80.133	01.07.2018	7.90	0.25		9.64
HH18	18-13	0	2	71.651	83.378	01.07.2018	14.10	0.00		9.81
HH18	18-14	0	1	71.067	83.144	01.07.2018	14.50	0.00		9.98
HH18	18-15	0	1	70.333	82.974	12.07.2018	15.90	0.05		8.99
HH18	18-16	0	1	72.436	80.837	13.07.2018	8.50	0.91		10.01
HH18	18-17	0	17	73.274	79.522	13.07.2018	7.10	2.17		9.48
HH18	18-18	0	20	73.678	78.139	13.07.2018	6.90	13.48		7.85
HH18	18-19	0	20	73.799	76.002	13.07.2018	4.00	11.06		9.36
HH18	18-20	0	21	73.793	73.113	14.07.2018	3.40	25.13		6.96
HH18	18-21	0	45	72.139	67.846	14.07.2018	4.80	30.67		3.30
HH18	18-22	0	17	71.549	66.924	14.07.2018	2.50	32.00		2.13
HH18	18-23	0	110	71.008	64.081	14.07.2018	2.40	32.56		1.98
HH18	18-24	0	100	70.802	60.781	15.07.2018	1.50	32.80		1.62
AMK76	6221	0	120	72.267	60.666	07.07.2019	1.86	32.81	2.49	
AMK76	6221	13	120	72.267	60.666	07.07.2019	1.83	32.82	1.35	
AMK76	6221	28	120	72.267	60.666	07.07.2019	-1.52	33.73	1.19	
AMK76	6221	50	120	72.267	60.666	07.07.2019	-0.93	34.18	1.71	
AMK76	6221	70	120	72.267	60.666	07.07.2019	-0.74	34.29	1.78	
AMK76	6221	90	120	72.267	60.666	07.07.2019	-0.56	34.39	1.47	
AMK76	6221	117	120	72.267	60.666	07.07.2019	-0.44	34.45	1.26	
AMK76	6221	0	120	72.267	60.666	07.07.2019	1.88	32.81	1.47	0.96

ВИ	ИИ	, М	М	G	e	Дата	ç	, %	ц	ц/
педиц	танц	ИЗОНТ	бина,	тофиј	TOTIC	.FFF	п-ра,	HOCTH	C, MJ	C, MI
Эксі	Nº c	Top	Глу	Ξ	ц	дд.ММ	Тем	Соле	TO	DC
AMK76	6221	13	120	72.267	60.666	07.07.2019	-1.28	33.80	1.32	1.41
AMK76	6221	28	120	72.267	60.666	07.07.2019	-0.92	34.07	1.57	1.35
AMK76	6221	42	120	72.267	60.666	07.07.2019	-0.89	34.24	1.41	1.27
AMK76	6221	60	120	72.267	60.666	07.07.2019			1.30	1.29
AMK76	6222	0	85	73.101	61.317	07.07.2019	2.10	32.26	1.64	
AMK76	6222	15	85	73.101	61.317	07.07.2019	2.09	32.27	1.58	
AMK76	6222	22	85	73.101	61.317	07.07.2019	-0.97	33.75	1.29	
AMK76	6222	29	85	73.101	61.317	07.07.2019	-1.14	33.97	1.82	
AMK76	6222	36	85	73.101	61.317	07.07.2019	-1.30	34.01	1.71	
AMK76	6222	50	85	73.101	61.317	07.07.2019	-1.31	34.17	1.13	
AMK76	6222	70	85	73.101	61.317	07.07.2019	-0.70	34.40	0.89	
AMK76	6222	81	85	73.101	61.317	07.07.2019	-0.55	34.43	1.39	
AMK76	6222	0	85	73.101	61.317	07.07.2019	2.10	32.29	1.55	1.04
AMK76	6222	15	85	73.101	61.317	07.07.2019	-0.16	33.32	1.07	1.00
AMK76	6222	22	85	73.101	61.317	07.07.2019	-1.06	33.92	1.16	0.96
AMK76	6222	29	85	73.101	61.317	07.07.2019	-1.14	33.97	1.53	1.10
AMK76	6222	50	85	73.101	61.317	07.07.2019	-1.30	34.17	1.52	1.12
AMK76	6222	83	85	73.101	61.317	07.07.2019	-0.59	34.42	1.55	1.14
								02	1.00	
AMK76	6223	0	370	74.876	62.837	08.07.2019	0.35	32.26	1.41	
AMK76	6223	5	370	74.876	62.837	08.07.2019	0.19	32.36	1.38	
AMK76	6223	10	370	74.876	62.837	08.07.2019	-1.27	33.37	1.28	
AMK76	6223	25	370	74.876	62.837	08.07.2019	-1.75	33.87	1.57	
AMK76	6223	45	370	74.876	62.837	08.07.2019	-1.80	33.97	1.05	
AMK76	6223	65	370	74.876	62.837	08.07.2019	-0.32	34.22	0.75	
AMK76	6223	120	370	74.876	62.837	08.07.2019	-0.25	34.39	0.90	
AMK76	6223	200	370	74.876	62.837	08.07.2019	-0.61	34.48	1.23	
AMK76	6223	300	370	74.876	62.837	08.07.2019	-0.75	34.61	0.93	
AMK76	6223	320	370	74.876	62.837	08.07.2019	-0.83	34.66	0.52	
AMK76	6224	0	123	75.047	65.162	08.07.2019	1.11	32.43	1.38	
AMK76	6224	8	123	75.047	65.162	08.07.2019	0.66	32.46	1.03	
AMK76	6224	20	123	75.047	65.162	08.07.2019	-1.26	33.70	1.12	
AMK76	6224	24	123	75.047	65.162	08.07.2019	-1.25	33.77	1.26	
AMK76	6224	45	123	75.047	65.162	08.07.2019	-1.05	34.10	1.60	
AMK76	6224	70	123	75.047	65.162	08.07.2019	0.01	34.31	0.99	
AMK76	6224	120	123	75.047	65.162	08.07.2019	-0.51	34.31	0.82	
ΔMK76	6224	0	140	75 047	65 162	08 07 2019			2 22	
1 11111/0	0224	v		13.04/	05.102	00.07.2019		L	2.22	

Таблица 1. Продолжение

ви	ИИ	, W	W	æ	I	Дата	°C	, %	ц/	ц/
диц	анц	THO	ина,	рота	loTč	LIL	pa,	OCTE	, мг,	, MГ
спе	2 CT2	риз	ıy6ı	Ши	Дол	M.FJ	-шм	лено	0C	OC
θĸ	Ž	Го	Ц Ц			- W.Д.	Te	Co.	E	D
AMK76	6224	2	140	75.047	65.162	08.07.2019	1.33	32.42	1.57	
AMK76	6224	8	140	75.047	65.162	08.07.2019	0.44	32.48	1.48	0.96
AMK76	6224	20	140	75.047	65.162	08.07.2019	-1.25	33.75	1.42	0.88
AMK76	6224	24	140	75.047	65.162	08.07.2019	-1.25	33.77	1.72	0.74
AMK76	6224	30	140	75.047	65.162	08.07.2019	-1.12	33.95	2.82	1.27
AMK76	6224	50	140	75.047	65.162	08.07.2019	-0.02	34.26	1.82	1.15
AMK76	6224	139	140	75.047	65.162	08.07.2019	-0.56	34.40	1.22	1.01
AMK76	6225	0	180	75.295	66.976	09.07.2019	-1.42	32.04	1.41	
AMK76	6225	6	180	75.295	66.976	09.07.2019	-1.47	32.08	1.14	
AMK76	6225	15	180	75.295	66.976	09.07.2019	-1.59	33.38	1.21	
AMK76	6225	25	180	75.295	66.976	09.07.2019	-1.66	33.74	1.25	
AMK76	6225	50	180	75.295	66.976	09.07.2019	-0.23	34.17	0.94	
AMK76	6225	80	180	75.295	66.976	09.07.2019	0.38	34.32	1.21	
AMK76	6225	125	180	75.295	66.976	09.07.2019	0.24	34.41	1.08	
AMK76	6225	180	180	75.295	66.976	09.07.2019	-0.34	34.47	1.05	
AMK76	6226	0	313	75.745	68.303	09.07.2019	-1.43	32.02	1.80	
AMK76	6226	9	313	75.745	68.303	09.07.2019	-1.44	32.26	1.70	
AMK76	6226	24	313	75.745	68.303	09.07.2019	-1.73	33.62	1.22	
AMK76	6226	40	313		68.303	09.07.2019	-1.64	33.90	1.13	
AMK76	6226	75	313	75.745	68.303	09.07.2019	-0.70	34.17	1.00	
AMK76	6226	120	313	75.745	68.303	09.07.2019	-0.27	34.39	1.46	
AMK76	6226	200	313	75.745	68.303	09.07.2019	-0.66	34.50	1.11	
AMK76	6226	250	313	75.745	68.303	09.07.2019	-0.72	34.58	0.85	
AMK76	6226	300	313	75.745	68.303	09.07.2019	-0.69	34.62	0.99	
AMK76	6227	0	303	75.883	69.532	09.07.2019	-0.41	32.40	1.54	
AMK76	6227	8	303	75.883	69.532	09.07.2019	-0.44	32.40	1.76	
AMK76	6227	25	303	75.883	69.532	09.07.2019	-1.73	33.72	1.35	
AMK76	6227	50	303	75.883	69.532	09.07.2019	-1.08	33.98	1.41	
AMK76	6227	70	303	75.883	69.532	09.07.2019	-0.30	34.20	1.30	
AMK76	6227	100	303	75.883	69.532	09.07.2019	-0.73	34.32	1.30	
AMK76	6227	120	303	75.883	69.532	09.07.2019	-0.14	34.40	1.10	
AMK76	6227	200	303	75.883	69.532	09.07.2019	-0.66	34.50	0.94	
AMK76	6227	250	303	75.883	69.532	09.07.2019	-0.72	34.57	1.17	
AMK76	6227	300	303	75.883	69.532	09.07.2019	-0.69	34.63	1.36	
AMK76	6228	0	335	76.083	70.762	09.07.2019	1.89	30.64	1.49	
AMK76	6228	7	335	76.083	70.762	09.07.2019	1.94	30.72	1.82	
AMK76	6228	15	335	76.083	70.762	09.07.2019	-1.03	32.87	1.55	

ви	ИИ	, М	М	B	e	Дата	°C	, %	ц	ц/
пида	анц	30HT	йна,	ирот	TOTE	TTT	I-pa,	HOCTI	, ML	Ú, MI
КСП(√o CJ	идо	Juy6	Π	До.	I.MM	емп	олен	IOC	DOQ
Ð	~		Ι			дд.]	L	Ŭ		
AMK76	6228	32	335	76.083	70.762	09.07.2019	-1.66	33.71	2.72	
AMK76	6228	44	335	76.083	70.762	09.07.2019	-1.58	33.85	2.13	
AMK76	6228	60	335	76.083	70.762	09.07.2019	-0.03	34.19	1.50	
AMK76	6228	100	335	76.083	70.762	09.07.2019	-1.81	34.22	1.39	
AMK76	6228	140	335	76.083	70.762	09.07.2019	-0.27	34.36	1.12	
AMK76	6228	200	335	76.083	70.762	09.07.2019	-0.35	34.47	1.08	
AMK76	6228	335	335	76.083	70.762	09.07.2019	-0.68	34.59	0.82	
	(22)									
AMK76	6229	0	165	76.150	72.036	09.07.2019	-0.38	32.88	1.17	
AMK76	6229	8	165	76.150	72.036	09.07.2019	-0.40	32.87	1.44	
AMK76	6229	15	165	76.150	72.036	09.07.2019	-1.43	33.56	1.38	
AMK76	6229	30	165	76.150	72.036	09.07.2019	-1.36	33.78	1.57	
AMK76	6229	50	165	76.150	72.036	09.07.2019	-0.43	34.08	1.03	
AMK76	6229	100	165	76.150	72.036	09.07.2019	-0.38	34.60	0.86	
AMK76	6229	120	165	76.150	72.036	09.07.2019	-0.68	34.70	1.08	
AMK76	6229	158	165	76.150	72.036	09.07.2019	-0.78	34.80	1.11	
	(22.0		100	=< 202	======		• • • •			
AMK/6	6230	0	100	76.283	73.362	09.07.2019	3.80	29.44	2.22	
AMK76	6230	8	100	76.283	73.362	09.07.2019	3.77	29.46	2.00	
AMK76	6230	18	100	76.283	73.362	09.07.2019	-1.66	33.36	1.94	
AMK76	6230	30	100	76.283	73.362	09.07.2019	-1.78	33.47	1.12	
AMK76	6230	50	100	76.283	73.362	09.07.2019	-1.22	33.75	1.38	
AMK76	6230	75	100	76.283	73.362	09.07.2019	-0.77	33.94	1.08	
AMK76	6230	98	100	76.283	73.362	09.07.2019	-0.61	33.99	1.08	
A MV 76	6221	0	100	76 122	74 642	10.07.2010	1.07	21.04	1.92	
AMK76	6221		100	76.422	74.042	10.07.2019	1.97	21.05	1.62	
AMK70	6221	15	100	76.422	74.042	10.07.2019	1.90	22.00	1.07	
AMK70	(221	15	100	70.433	74.042	10.07.2019	0.02	33.08	1.44	
AMK/0	6231	55	100	/0.433	74.042	10.07.2019	-1.51	33./3	1.50	
AMK/0	6231	55	100	/0.433	74.042	10.07.2019	-0.6/	34.01	1.10	
AMK/6	6231	93	100	/6.433	/4.642	10.07.2019	0.01	34.30	1.20	
AMK76	6232	0	125	76.566	75.964	10.07.2019	3.51	29.59	2.26	
AMK76	6232	6	125	76.566	75.964	10.07.2019	3.53	29.56	2.52	
AMK76	6232	12	125	76.566	75.964	10.07.2019	0.00	33.10	1.67	
AMK76	6232	30	125	76.566	75.964	10.07 2019	-1.29	33.65	1.51	
AMK76	6232	35	125	76 566	75 964	10.07.2019	-1 44	33 75	1.61	
AMK76	6232	65	125	76 566	75 964	10.07.2019	0.06	34.16	1.61	
$\Delta M K 76$	6232	121	125	76.566	75 06/	10.07.2019	-0.15	34.10	1.01	
	0232	121	123	/0.300	75.704	10.07.2019	-0.15	J 1 .J/	1.33	

Таблица 1. Продолжение

KI	И	М	W			Дата	С	%	Е	Б
тип	нци	OHT,	на,	юта	ота	L	pa, °	CTb,	MI/.	MI/
тел	ста	ОИЗС	уби	Пиј	шој	М.ГГ	-Ш	ieHc	ЭС,	oC,
Экс	Š	Ioj	Г	Π	Ц	д.М1	Ten	Сол	Τ	D
AMK76	6233	0	66.4	76 766	77.018	년 10.07.2019	2 27	20.31	1 75	
AMK76	6233	10	66 4	76.766	77.918	10.07.2019	2.27	29.31	1.75	
AMK76	6233	21	66.4	76.766	77 918	10.07.2019	-1.57	32.91	2 74	
AMK76	6233	40	66.4	76.766	77.918	10.07.2019	-1.72	33.47	1.89	
AMK76	6233	50	66.4	76,766	77.918	10.07.2019	-1.35	33.68	1.18	
AMK76	6233	61	66.4	76.766	77.918	10.07.2019	-0.90	33.82	1.33	
AMK76	6234	0	107	76.752	78.368	10.07.2019	0.64	28.42	2.80	
AMK76	6234	6	107	76.752	78.368	10.07.2019	0.65	28.45	2.37	
AMK76	6234	10	107	76.752	78.368	10.07.2019	1.31	30.60	2.13	
AMK76	6234	20	107	76.752	78.368	10.07.2019	-1.55	32.80	1.48	
AMK76	6234	26	107	76.752	78.368	10.07.2019	-1.67	33.16	2.05	
AMK76	6234	40	107	76.752	78.368	10.07.2019	-1.75	33.48	1.41	
AMK76	6234	60	107	76.752	78.368	10.07.2019	-0.74	33.83	1.10	
AMK76	6234	101	107	76.752	78.368	10.07.2019	-0.67	33.99	1.13	
AMK76	6234	0	107	76.752	78.368	10.07.2019	0.69	28.56	1.83	2.00
AMK76	6234	27	107	76.752	78.368	10.07.2019	0.70	28.60	1.97	1.39
AMK76	6234	40	107	76.752	78.368	10.07.2019	-1.74	33.46	1.31	1.13
AMK76	6234	95	107	76.752	78.368	10.07.2019	-0.68	33.98	1.20	1.06
AMK76	6235	0	182	76.397	71.351	12.07.2019	2.57	30.90	2.18	
AMK76	6235	8	182	76.397	71.351	12.07.2019	2.38	30.93	2.54	
AMK76	6235	17	182	76.397	71.351	12.07.2019	-0.26	33.75	1.43	
AMK76	6235	30	182	76.397	71.351	12.07.2019	0.03	34.31	0.89	
AMK76	6235	50	182	76.397	71.351	12.07.2019	-0.23	34.45	1.21	
AMK76	6235	90	182	76.397	71.351	12.07.2019	-0.81	34.72	0.94	
AMK76	6235	125	182	76.397	71.351	12.07.2019	-0.49	34.82	0.85	
AMK76	6235	175	182	76.397	71.351	12.07.2019	-0.45	34.82	1.03	
AMK76	6235	0	182	76.397	71.351	12.07.2019	2.68	30.91	1.66	1.99
AMK76	6235	17	182	76.397	71.351	12.07.2019	-0.54	33.56	1.31	1.32
AMK76	6235	30	182	76.397	71.351	12.07.2019	0.02	34.33	1.20	1.40
AMK76	6235	90	182	76.397	71.351	12.07.2019	-0.85	34.72	0.94	1.17
AMK76	6235	170	182	76.397	71.351	12.07.2019	-0.46	34.82	0.95	0.90
	())(0	227	76 (22	71 251	12 07 2010	2.52	22.95	1 47	
AMK/0	6236	0	237	/0.033	/1.251	12.07.2019	2.53	32.85	1.4/	
AMK/0	0230	5 10	237	/0.033	/1.251	12.07.2019	2.23	32.93	1.00	
AWK/0	6230	10	237	/0.033	71.251	12.07.2019	1.32	34.30 24.50	1.02	
AWK/0	0230	3U 60	237	/0.033	71.251	12.07.2019	1.31	54.59 24.72	1.23	
AWK/0	0230	00	23/	/0.033	/1.231	12.07.2019	-0.18	34./3	1.25	

ВИ	ИИ	, М	М	e e		Дата	°C	, %	ц	ц/
Экспедиц	№ станці	Горизонт	Глубина,	Широт	Долгота	ДД.ММ.ГГГГ	Темп-ра,	Соленость	TOC, MI/	DOC, MF
AMK76	6236	80	237	76.633	71.251	12.07.2019	-0.46	34.76	0.88	
AMK76	6236	120	237	76.633	71.251	12.07.2019	-0.50	34.78	1.00	
AMK76	6236	170	237	76.633	71.251	12.07.2019	-0.49	34.81	1.25	
AMK76	6236	229	237	76.633	71.251	12.07.2019	-0.48	34.83	1.05	
AMK76	6229_2	0	167	76.150	72.033	12.07.2019	1.23	31.49	1.69	
AMK76	6229_2	10	167	76.150	72.033	12.07.2019	0.17	32.56	1.83	
AMK76	6229_2	17	167	76.150	72.033	12.07.2019	-0.74	33.49	1.89	
AMK76	6229_2	40	167	76.150	72.033	12.07.2019	-0.34	34.09	1.23	
AMK76	6229_2	60	167	76.150	72.033	12.07.2019	0.17	34.23	0.91	
AMK76	6229_2	80	167	76.150	72.033	12.07.2019	0.10	34.31	1.44	
AMK76	6229_2	110	167	76.150	72.033	12.07.2019	0.15	34.59	1.44	
AMK76	6229_2	158	167	76.150	72.033	12.07.2019	-0.76	34.78	0.92	
AMK76	6238	0	402	76.765	70.879	13.07.2019	1.97	34.53	0.96	
AMK76	6238	10	402	76.765	70.879	13.07.2019	1.74	34.52	1.23	
AMK76	6238	30	402	76.765	70.879	13.07.2019	1.64	34.53	1.08	
AMK76	6238	50	402	76.765	70.879	13.07.2019	1.04	34.61	1.09	
AMK76	6238	75	402	76.765	70.879	13.07.2019	-0.08	34.74	0.89	
AMK76	6238	100	402	76.765	70.879	13.07.2019	-0.23	34.77	1.20	
AMK76	6238	200	402	76.765	70.879	13.07.2019	-0.36	34.85	0.79	
AMK76	6238	300	402	76.765	70.879	13.07.2019	-0.42	34.85	1.15	
AMK76	6238	399	402	76.765	70.879	13.07.2019	-0.39	34.86	1.08	
AMK76	6239	0	177	75.833	72.367	13.07.2019	4.96	27.69	2.62	
AMK76	6239	7	177	75.833	72.367	13.07.2019	4.69	28.12	2.39	
AMK76	6239	15	177	75.833	72.367	13.07.2019	1.54	32.20	1.41	
AMK76	6239	30	177	75.833	72.367	13.07.2019	-1.67	33.58	1.65	
AMK76	6239	36	177	75.833	72.367	13.07.2019	-1.66	33.68	1.53	
AMK76	6239	50	177	75.833	72.367	13.07.2019	-1.35	33.81	1.27	
AMK76	6239	75	177	75.833	72.367	13.07.2019	-0.69	33.97	1.17	
AMK76	6239	110	177	75.833	72.367	13.07.2019	0.07	34.19	1.23	
AMK76	6239	150	177	75.833	72.367	13.07.2019	-0.17	34.28	1.16	
AMK76	6239	173	177	75.833	72.367	13.07.2019	-0.15	34.35	1.08	
AMK76	6240	0	37	75.334	72.585	14.07.2019	2.64	30.29	3.43	
AMK76	6240	7	37	75.334	72.585	14.07.2019	-1.42	33.35	1.35	
AMK76	6240	10	37	75.334	72.585	14.07.2019	-1.42	33.39	1.12	
AMK76	6240	20	37	75.334	72.585	14.07.2019	-1.42	33.39	2.35	
AMK76	6240	33	37	75.334	72.585	14.07.2019	-1.42	33.39	3.11	

ВИ	ии	W (W	B		Дата	°C	, %	ц/	ц/
Экспедиц	№ станці	Горизонт	Глубина,	Широта	Долгота	I.H.MM.FIFF	Темп-ра,	Соленость	ТОС, мг/	DOC, MF,
AMK76	6241	0	27	74.668	72.832	14.07.2019	7.44	7.56	7.72	
AMK76	6241	5	27	74.668	72.832	14.07.2019	6.58	18.90	4.57	
AMK76	6241	10	27	74.668	72.832	14.07.2019	3.20	25.12	2.75	
AMK/6	6241	18	27	74.668	72.832	14.07.2019	2.87	26.81	2.50	
AMK76	6241	23	27	74.668	72.832	14.07.2019	-1.19	29.73	2.17	
AMK76	6242	0	31	73.909	72.986	15.07.2019	6.24	8.83	8.03	
AMK76	6242	6	31	73.909	72.986	15.07.2019	2.41	18.66	3.73	
AMK76	6242	15	31	73.909	72.986	15.07.2019	1.82	26.06	2.64	
AMK76	6242	20	31	73.909	72.986	15.07.2019	1.10	26.94	2.16	
AMK76	6242	27	31	73.909	72.986	15.07.2019	-1.59	31.65	2.28	
AMK76	6242	0	31	73.909	72.986	15.07.2019	6.14	8.82		7.48
AMK76	6242	15	31	73.909	72.986	15.07.2019	1.69	26.26		2.86
AMK76	6242	27	31	73.909	72.986	15.07.2019	-1.59	31.80		1.82
AMK76	6244	0	21	73.242	73.289	15.07.2019	4.74	6.10	10.02	
AMK76	6244	5	21	73.242	73.289	15.07.2019	3.18	11.51	7.47	
AMK76	6244	10	21	73.242	73.289	15.07.2019	-0.58	24.08	3.23	
AMK76	6244	15	21	73.242	73.289	15.07.2019	-1.29	30.27	3.22	
AMK76	6244	19	21	73.242	73.289	15.07.2019	-1.42	31.13	2.41	
AMK76	6246	0	23	72.666	73.420	15.07.2019	0.75	0.22	8.79	
AMK76	6246	5	23	72.666	73,420	15.07.2019	0.74	0.28	8.36	
AMK76	6246	10	23	72.666	73.420	15.07.2019	-0.87	28.18	2.86	
AMK76	6246	20	23	72.666	73.420	15.07.2019	-1.06	29.56	3.54	
AMK76	6248	0	12	72 249	73 469	16 07 2019	1.26	0.12	7 74	
AMK76	6248	5	12	72.219	73.469	16 07 2019	1.20	0.12	7 59	
AMK76	6248	9	12	72.249	73.469	16.07.2019	1.24	0.12	7.62	
A MV 76	6240	0	12	72 417	72 444	16 07 2010	1 26	0.44	0.01	
AMK76	6249	6	12	72.417	73.444	16.07.2019	1.30	0.44	8 02	
AMK76	6249	0	12	72.417	73.444	16.07.2019	0.20	14.00	6.40	
	0247	7	12	/2.41/	/3.444	10.07.2019	0.37	14.70	0.47	
AMK76	6250	0	19	72.583	73.400	16.07.2019	1.22	0.27	8.41	
AMK76	6250	5	19	72.583	73.400	16.07.2019	1.21	0.28	8.25	
AMK76	6250	9	19	72.583	73.400	16.07.2019	-0.93	28.09	3.32	
AMK76	6250	16	19	72.583	73.400	16.07.2019	-0.97	28.51	2.95	

242

Таблица 1. Продолжение

ВИ	ИИ	, M	М	в	в	Дата	°C	,%	ц	ц/
Экспедиц	№ станці	Горизонт	Глубина,	Широт	Долгота	Д.ММ.ГГГГ	Темп-ра,	Соленость	TOC, MI,	DOC, MI
AMK76	6251	0	10	72.186	74.139	<u></u> ⊓ 16.07.2019	3.73	1.51	9.60	
AMK76	6251	4	10	72.186	74.139	16.07.2019	2.92	1.99	9.35	
AMK76	6251	6	10	72.186	74.139	16.07.2019	2.80	2.02	9.36	
AMK76	6251	10	10	72.186	74.139	16.07.2019	1.24	8.07	7.87	
AMK76	6253	0	12	72.166	74.749	16.07.2019	3.04	0.42	10.27	
AMK76	6253	4	12	72.166	74.749	16.07.2019	3.06	0.43	10.20	
AMK76	6253	9	12	72.166	74.749	16.07.2019	2.49	1.56	10.20	
AMK76	6254	0	16	71.867	73.199	16.07.2019	1.66	0.16	8.60	
AMK76	6254	7	16	71.867	73.199	16.07.2019	1.68	0.16	9.08	
AMK76	6254	14	16	71.867	73.199	16.07.2019	1.67	0.16	8.96	
AMK76	6255	0	15	72.583	74.462	17.07.2019	2.95	1.60	9.96	9.36
AMK76	6255	8	15	72.583	74.462	17.07.2019	2.81	1.89	11.25	
AMK76	6255	10	15	72.583	74.462	17.07.2019	-0.54	23.11	3.16	
AMK76	6255	13	15	72.583	74.462	17.07.2019	-1.01	28.46	3.04	
AMK76	6256	0	29	72.998	73.002	17.07.2019	3.94	1.42	9.76	
AMK76	6256	5	29	72.998	73.002	17.07.2019	3.60	7.32	8.21	
AMK76	6256	12	29	72.998	73.002	17.07.2019	0.04	25.38	3.48	
AMK76	6256	18	29	72.998	73.002	17.07.2019	-1.42	31.01	2.33	
AMK76	6256	26	29	72.998	73.002	17.07.2019	-1.49	31.55	2.10	
AMK76	6242_2	0	30	73.910	72.978	17.07.2019	7.19	8.22	8.65	
AMK76	6242_2	5	30	73.910	72.978	17.07.2019	7.06	8.67	8.07	
AMK76	6242_2	10	30	73.910	72.978	17.07.2019	1.85	25.75	3.03	
AMK76	6242_2	20	30	73.910	72.978	17.07.2019	-1.04	30.65	2.41	
AMK76	6242_2	27	30	73.910	72.978	17.07.2019	-1.39	31.61	3.02	
AMK76	6242_2	0	30	73.910	72.978	17.07.2019	7.19	8.20		7.38
AMK76	6242_2	15	30	73.910	72.978	17.07.2019	2.10	26.89		2.51
AMK76	6242_2	27	30	73.910	72.978	17.07.2019	-1.38	31.61		1.75
AMK76	6226_2	0	310	75.745	68.303	18.07.2019	4.58	31.44	6.50	
AMK76	6226_2	5	310	75.745	68.303	18.07.2019	3.13	32.22	2.90	
AMK76	6226_2	10	310	75.745	68.303	18.07.2019	0.47	32.36	1.98	
AMK76	6226_2	15	310	75.745	68.303	18.07.2019	-1.31	33.37	6.21	
AMK76	6226_2	37	310	75.745	68.303	18.07.2019	-1.73	33.90	8.10	
AMK76	6226_2	69	310	75.745	68.303	18.07.2019	-1.30	34.02	2.40	
AMK76	6226_2	100	310	75.745	68.303	18.07.2019	-0.32	34.33	4.09	

ви	ИИ	, М	М	a a	t	Дата	°C	, %	ц	п/
Экспедиц	№ станці	Горизонт	Глубина,	Широт	Долгота	дд.мм.гггг	Темп-ра,	Соленостн	ТОС, мг,	DOC, MF
AMK76	6226_2	140	310	75.745	68.303	18.07.2019	-0.26	34.43	2.44	
AMK76	6226_2	200	310	75.745	68.303	18.07.2019	-0.68	34.50	4.44	
AMK76	6226_2	250	310	75.745	68.303	18.07.2019	-0.72	34.57	4.92	
AMK76	6226_2	307	310	75.745	68.303	18.07.2019	-0.68	34.62	4.89	
AMK76	6226_2	0	310	75.745	68.303	18.07.2019	4.44	31.43	5.32	2.10
AMK76	6226_2	30	310	75.745	68.303	18.07.2019	-1.64	33.77	10.23	2.11
AMK76	6226_2	36	310	75.745	68.303	18.07.2019	-1.69	33.88	3.78	1.30
AMK76	6226_2	60	310	75.745	68.303	18.07.2019	-0.82	34.05	6.29	2.05
AMK76	6226_2	140	310	75.745	68.303	18.07.2019	-0.24	34.43	6.61	2.15
AMK76	6226_2	290	310	75.745	68.303	18.07.2019	-0.68	34.62	2.38	1.90
AMK76	6224_2	0	120	75.047	65.162	19.07.2019	2.72	32.46	1.36	
AMK76	6224_2	10	120	75.047	65.162	19.07.2019	1.29	32.51	2.46	
AMK76	6224_2	25	120	75.047	65.162	19.07.2019	-1.31	33.71	2.04	
AMK76	6224_2	42	120	75.047	65.162	19.07.2019	-0.93	34.04	3.80	
AMK76	6224_2	75	120	75.047	65.162	19.07.2019	-0.95	34.28	3.59	
AMK76	6224_2	100	120	75.047	65.162	19.07.2019	-0.71	34.37	1.32	
AMK76	6224_2	117	120	75.047	65.162	19.07.2019	-0.66	34.40	1.45	
AMK76	6224_2	0	120	75.047	65.162	19.07.2019	2.86	32.41		1.71
AMK76	6224_2	28	120	75.047	65.162	19.07.2019	-1.31	33.70		1.71
AMK76	6224_2	42	120	75.047	65.162	19.07.2019	-0.79	34.08		2.94
AMK76	6224_2	100	120	75.047	65.162	19.07.2019	-0.70	34.37		3.30
AMK76	6222_2	0	91	73.101	61.317	21.07.2019	3.53	32.52	3.18	
AMK76	6222_2	12	91	73.101	61.317	21.07.2019	3.53	32.54	3.03	
AMK76	6222_2	20	91	73.101	61.317	21.07.2019	-0.59	33.75	2.23	
AMK76	6222_2	40	91	73.101	61.317	21.07.2019	-1.42	34.06	2.19	
AMK76	6222_2	60	91	73.101	61.317	21.07.2019	-1.25	34.19	1.79	
AMK76	6222_2	0	91	73.101	61.317	21.07.2019	3.55	32.50		2.54
AMK76	6222_2	15	91	73.101	61.317	21.07.2019	3.10	32.66	2.30	2.53
AMK76	6222_2	27	91	73.101	61.317	21.07.2019	-0.97	33.92	8.23	7.20
AMK76	6222_2	42	91	73.101	61.317	21.07.2019	-1.43	34.10	2.23	1.92
AMK76	6222_2	50	91	73.101	61.317	21.07.2019	-1.42	34.13	2.80	2.72
AMK76	6222_2	89	91	73.101	61.317	21.07.2019	-0.72	34.39	2.95	3.79
AMK76	6224_3	0	120	75.046	65.164	31.07.2019	7.27	27.80	2.41	
AMK76	6224_3	4	120	75.046	65.164	31.07.2019	7.27	27.81	2.52	
AMK76	6224_3	14	120	75.046	65.164	31.07.2019	1.72	32.97	1.17	

ВИ	ИИ	М	М	_	_	Дата	°C	, %	Ľ,	ц/
диц	ПНЦ	онт,	1на,	рота	lota	LIL	pa,	ость	, MI/	, MI,
спе,	ста	риз	ıy6ı	Шиј	цол	M.FI	-шм	лена	ŐČ	OC
Эк	Ž	Го	Ē			ДД.М	Te	Co	H	D
AMK76	6224_3	30	120	75.046	65.164	31.07.2019	-1.49	33.84	1.75	
AMK76	6224_3	53	120	75.046	65.164	31.07.2019	-0.64	34.20	1.89	
AMK76	6224_3	68	120	75.046	65.164	31.07.2019	-1.08	34.24	1.67	
AMK76	6224_3	116	120	75.046	65.164	31.07.2019	-0.74	34.41	1.62	
AMK76	6224_3	0	120	75.046	65.164	31.07.2019	7.25	27.76	2.51	2.43
AMK76	6224_3	34	120	75.046	65.164	31.07.2019	-1.54	33.90	1.52	1.20
AMK76	6224_3	54	120	75.046	65.164	31.07.2019	-0.67	34.19	1.56	1.25
AMK76	6224_3	65	120	75.046	65.164	31.07.2019	-0.76	34.25	1.33	1.13
AMK76	6224_3	85	120	75.046	65.164	31.07.2019	-0.60	34.33	1.20	1.17
AMK76	6224_3	105	120	75.046	65.164	31.07.2019	-0.73	34.39	1.24	1.40
AMK76	6222 3	0	85	73.101	61.313	01.08.2019	4.74	32.82	2.51	
AMK76	6222 3	10	85	73.101	61.313	01.08.2019			1.24	
AMK76	6222 3	15	85	73.101	61.313	01.08.2019	4.74	32.82	2.54	
AMK76	6222 3	48	85	73.101	61.313	01.08.2019	-1.40	34.11	1.14	
AMK76	6222 3	70	85	73.101	61.313	01.08.2019	-0.79	34.34	1.56	
AMK76	6222_3	83	85	73.101	61.313	01.08.2019	-0.67	34.38	1.70	
AMK81	6877	0	91	73.102	61.319	01.09.2020	8.09	32.98	2.77	2.12
AMK81	6877	20	91	73.102	61.319	01.09.2020	5.22	33.16	2.26	1.60
AMK81	6877	27	91	73.102	61.319	01.09.2020	-0.82	33.48	2.00	2.19
AMK81	6877	89	91	73.102	61.319	01.09.2020	-0.40	34.33	2.02	2.50
AMK81	6879	0	171	75.670	72.233	02.09.2020	9.32	13.96	5.62	5.21
AMK81	6879	6	171	75.670	72.233	02.09.2020	8.95	21.16	4.10	3.79
AMK81	6879	14	171	75.670	72.233	02.09.2020	5.64	31.82	1.76	1.60
AMK81	6879	30	171	75.670	72.233	02.09.2020	-0.91	32.97	1.51	1.43
AMK81	6879	50	171	75.670	72.233	02.09.2020	-0.65	33.58	1.84	
AMK81	6879	75	171	75.670	72.233	02.09.2020	-0.04	34.01	2.10	1.36
AMK81	6879	100	171	75.670	72.233	02.09.2020	0.02	34.14	1.56	
AMK81	6879	166	171	75.670	72.233	02.09.2020	-0.16	34.28	1.56	1.38
AMK81	6881	0	164	76.149	72.028	03.09.2020	8.67	23.97	3.79	3.33
AMK81	6881	6	164	76.149	72.028	03.09.2020	8.45	26.69	2.91	
AMK81	6881	10	164	76.149	72.028	03.09.2020	8.12	27.73	3.47	2.37
AMK81	6881	18	164	76.149	72.028	03.09.2020	-0.42	32.39	1.56	1.52
AMK81	6881	40	164	76.149	72.028	03.09.2020	-0.95	33.11	1.41	-
AMK81	6881	60	164	76.149	72.028	03.09.2020	-0.24	33.81	1.61	
AMK81	6881	100	164	76.149	72.028	03.09.2020	-0.07	34.16	1.92	

Таблица 1. Продолжение

ви	ИІ	М	М	_		Дата	C	%	5	Ц
ЦИЦ	1 THI	онт,	іна,	pote	гота	II	pa, '	CTb	MI/	, ML/
спе,	ста	риз	ıy6ı	Шиј	Цол	M.FI	-ШМ	тенс	OC,	Ő
ЭК	Ž	Го	Ľ			M.LJ	Te	Co	F	D
AMK81	6881	159	164	76,149	72.028	03.09.2020	-0.23	34.32	1.50	
11111101	0001	107	101	/ 011 1/	/21020		0.20	0 1102	110 0	
AMK81	6883	0	180	76.403	71.341	03.09.2020	8.56	24.66	3.64	2.86
AMK81	6883	7	180	76.403	71.341	03.09.2020	8.10	28.66	2.74	2.67
AMK81	6883	25	180	76.403	71.341	03.09.2020	-0.61	32.90	1.79	1.24
AMK81	6883	50	180	76.403	71.341	03.09.2020	-0.51	33.65	1.63	1.58
AMK81	6883	100	180	76.403	71.341	03.09.2020	-0.30	34.41	1.41	1.43
AMK81	6883	176.5	180	76.403	71.341	03.09.2020	-0.21	34.44	1.55	1.27
AMK81	6884	0	230	76.632	71.266	03.09.2020	5.65	33.66	1.69	1.65
AMK81	6884	13	230	76.632	71.266	03.09.2020	5.90	33.99	2.36	1.27
AMK81	6884	25	230	76.632	71.266	03.09.2020	2.92	34.27	1.86	
AMK81	6884	40	230	76.632	71.266	03.09.2020	2.45	34.34	1.93	1.39
AMK81	6884	60	230	76.632	71.266	03.09.2020	2.04	34.43	1.50	
AMK81	6884	100	230	76.632	71.266	03.09.2020	1.18	34.60	1.94	
AMK81	6884	150	230	76.632	71.266	03.09.2020	1.04	34.64	2.34	
AMK81	6884	200	230	76.632	71.266	03.09.2020	0.41	34.77	2.51	
AMK81	6884	226	230	76.632	71.266	03.09.2020	0.36	34.78	2.83	
AMK81	6886	8	401	76.766	70.880	04.09.2020	5.48	34.35	1.68	1.16
AMK81	6886	15	401	76.766	70.880	04.09.2020	5.24	34.36	1.30	
AMK81	6886	22	401	76.766	70.880	04.09.2020	3.88	34.48	1.38	1.24
AMK81	6886	40	401	76.766	70.880	04.09.2020	1.69	34.64	1.46	1.44
AMK81	6886	60	401	76.766	70.880	04.09.2020	0.57	34.77	1.15	
AMK81	6886	100	401	76.766	70.880	04.09.2020	0.00	34.79	0.98	
AMK81	6886	200	401	76.766	70.880	04.09.2020	0.20	34.85	1.11	
AMK81	6886	393	401	76.766	70.880	04.09.2020	0.12	34.86	1.02	
AMK81	6887	0	527	76.947	70.375	04.09.2020	5.39	34.34	1.55	1.64
AMK81	6887	13	527	76.947	70.375	04.09.2020	5.38	34.35	1.51	
AMK81	6887	25	527	76.947	70.375	04.09.2020	4.75	34.40	1.83	1.55
AMK81	6887	42	527	76.947	70.375	04.09.2020	-0.63	34.52	1.53	
AMK81	6887	50	527	76.947	70.375	04.09.2020	-0.61	34.57	1.38	1.45
AMK81	6887	60	527	76.947	70.375	04.09.2020	-0.29	34.65	1.43	
AMK81	6887	92	527	76.947	70.375	04.09.2020	0.53	34.79	1.08	0.97
AMK81	6887	150	527	76.947	70.375	04.09.2020	-0.31	34.77	1.25	
AMK81	6887	200	527	76.947	70.375	04.09.2020	-0.84	34.77	1.07	
AMK81	6887	300	527	76.947	70.375	04.09.2020	-0.22	34.87	1.01	
AMK81	6887	400	527	76.947	70.375	04.09.2020	-0.76	34.84	0.90	0.97
AMK81	6887	520	527	76.947	70.375	04.09.2020	-0.85	34.84	1.19	1.17

Таблица 1. Продолжение

ви	ИИ	, M	М	æ	I	Дата	°C	%	ц	ц/
Экспедиц	№ станці	Горизонт	Глубина,	Широта	Долгота	(Д.MM.FITT	Темп-ра,	Соленость	TOC, MI ₇	DOC, MI,
AMK81	6902	0	285	76.157	69.614	06.09.2020	7.80	29.71		2.26
AMK81	6902	10	285	76.157	69.614	06.09.2020	7.01	31.42	3.87	4.32
AMK81	6902	20	285	76.157	69.614	06.09.2020	1.91	32.60	1.88	
AMK81	6902	30	285	76.157	69.614	06.09.2020	0.69	33.05	1.59	
AMK81	6902	40	285	76.157	69.614	06.09.2020	1.44	33.43	1.89	1.60
AMK81	6902	60	285	76.157	69.614	06.09.2020	0.45	34.02	1.55	
AMK81	6902	120	285	76.157	69.614	06.09.2020	0.07	34.30	1.18	
AMK81	6902	200	285	76.157	69.614	06.09.2020	0.34	34.43	1.47	1.28
AMK81	6902	279	285	76.157	69.614	06.09.2020	0.57	34.55	1.58	
AMK81	6903	0	233	75.867	66.768	06.09.2020	5.60	30.64		1.45
AMK81	6903	8	233	75.867	66.768	06.09.2020	5.39	31.42	2.27	
AMK81	6903	12	233	75.867	66.768	06.09.2020	3.53	32.21		1.59
AMK81	6903	16	233	75.867	66.768	06.09.2020	0.05	33.03	2.88	
AMK81	6903	25	233	75.867	66.768	06.09.2020	1.34	33.38	1.68	
AMK81	6903	30	233	75.867	66.768	06.09.2020	1.33	33.46	1.61	1.81
AMK81	6903	50	233	75.867	66.768	06.09.2020	0.63	34.08	2.18	
AMK81	6903	100	233	75.867	66.768	06.09.2020	0.31	34.37	1.52	
AMK81	6903	150	233	75.867	66.768	06.09.2020	0.41	34.44	1.70	1.46
AMK81	6903	231	233	75.867	66.768	06.09.2020	0.70	34.55	1.37	
A MV 91	6011	0	111	75 551	62 027	10.00.2020	6 18	21.67	1.76	1.42
AMK01	6011	10	222	75.551	62 027	10.09.2020	5.07	21.70	1.70	1.42
AMK01	6011	10	222	75.551	62 027	10.09.2020	0.22	22.02	1.30	1 20
AMK01	6011	20	222	75.551	62 027	10.09.2020	1.27	22 56	1.70	1.29
AMK01	6011	50	222	75.551	62 027	10.09.2020	0.48	24.20	1.55	1.57
AMK81	6011	100	222	75.551	63 027	10.09.2020	0.40	34.20	1.39	1.57
AMK01	6011	100	222	75.551	62 027	10.09.2020	0.30	24.57	1.40	1.52
AMK81	6011	217	222	75.551	63 927	10.09.2020	0.35	34.42	1.52	1.32
AWIN01	0911	217	222	75.551	03.927	10.09.2020	0.40	54.45	1.00	
AMK81	6912	0	308	75.472	64.179	10.09.2020	6.10	31.44	1.77	1.29
AMK81	6912	12	308	75.472	64.179	10.09.2020	6.10	31.75	1.37	
AMK81	6912	17	308	75.472	64.179	10.09.2020	2.33	32.15	1.36	
AMK81	6912	25	308	75.472	64.179	10.09.2020	1.03	33.35	1.39	1.32
AMK81	6912	27	308	75.472	64.179	10.09.2020	1.11	33.41	1.55	
AMK81	6912	40	308	75.472	64.179	10.09.2020	0.87	33.87	1.26	1.12
AMK81	6912	80	308	75.472	64.179	10.09.2020	0.46	34.29	1.05	
AMK81	6912	120	308	75.472	64.179	10.09.2020	0.43	34.39	1.17	
AMK81	6912	200	308	75.472	64.179	10.09.2020	0.49	34.51	1.23	
Таблица 1. Продолжение

ВИ	ии	, М	W ,	а	es es	Дата	°C	, %	ц/	ц/
Экспедии	№ станц	Горизонт	Глубина,	Широт	Долгот	ДД.ММ.ГГГГ	Темп-ра,	Солености	ТОС, мг	DOC, MI
AMK81	6912	301	308	75.472	64.179	10.09.2020	0.70	34.62	1.03	0.99
AMK81 AMK81 AMK81 AMK81	6913 6913 6913 6913	0 10 28 35	366 366 366 366	74.781 74.781 74.781 74.781	62.358 62.358 62.358 62.358	11.09.2020 11.09.2020 11.09.2020 11.09.2020	7.10 6.71 1.09 1.09	32.77 32.64 33.55 33.55	1.83 1.59 1.86 1.83	1.40 1.66 1.41
AMK81 AMK81 AMK81 AMK81 AMK81	6913 6913 6913 6913 6913	36 50 100 150 200	366 366 366 366 366	74.781 74.781 74.781 74.781 74.781 74.781	62.358 62.358 62.358 62.358 62.358 62.358	11.09.2020 11.09.2020 11.09.2020 11.09.2020 11.09.2020 11.09.2020	1.20 0.80 0.56 0.55 0.48	33.71 34.03 34.31 34.41 34.48	1.53 1.50 1.35 1.68 1.55	
AMK81	6913	360	366	74.781	62.358	11.09.2020	0.75	34.64	1.11	1.16
AMK81 AMK81	6877_2 6877_2	0 5	126 126	73.101 73.101	61.325 61.325	11.09.2020 11.09.2020	8.18	32.70	1.68 1.81	1.02
AMK81 AMK81 AMK81	6877_2 6877_2 6877_2	14 30 40	126 126 126	73.101 73.101 73.101	61.325 61.325 61.325	11.09.2020 11.09.2020 11.09.2020	8.13 -0.86 -0.76	32.72 33.63 33.89	1.61 2.23 1.27	1.15 1.13
AMK81 AMK81	6877_2 6877_2	93 120	126 126	73.101 73.101	61.325 61.325	11.09.2020 11.09.2020	-0.36 -0.36	34.33 34.33	1.13 1.26	1.06
AMK81 AMK81	6916 6916	0 14	319 319	72.350 72.350	57.134 57.134	13.09.2020 13.09.2020	7.40 7.27	32.54 32.26	1.47 1.26	1.22
AMK81 AMK81	6916 6916	25 40	319 319	72.350 72.350	57.134 57.134	13.09.2020 13.09.2020	-1.34 -1.37	33.56 33.80	1.23 1.23	1.01
AMK81 AMK81 AMK81 AMK81 AMK81	6916 6916 6916 6916 6916	60 100 150 200 250	319 319 319 319 319 319	72.350 72.350 72.350 72.350 72.350	57.134 57.134 57.134 57.134 57.134	13.09.2020 13.09.2020 13.09.2020 13.09.2020 13.09.2020	-0.81 -0.50 -0.52 -0.61 -0.72	34.19 34.41 34.50 34.55 34.62	1.18 1.08 1.05 0.97 0.92	1.06
AMK81	6916	313	319	72.350	57.134	13.09.2020	-0.82	34.65	0.92	1.00
AMK81 AMK81	6922 6922	0 10	218 218	74.882 74.882	61.483 61.483	16.09.2020 16.09.2020	6.01 5.90	31.38 31.95	2.77 2.13	1.48
AMK81 AMK81 AMK81	6922 6922 6922	20 30 50	218 218 218	74.882 74.882 74.882	61.483 61.483 61.483	16.09.2020 16.09.2020 16.09.2020	0.49 -1.34 -0.66	33.11 33.60 34.14	1.29 1.56 1.43	1.67
AMK81 AMK81 AMK81	6922 6922 6922	70 150 215	218 218 218	74.882 74.882 74.882	61.483 61.483 61.483	16.09.2020 16.09.2020 16.09.2020	-0.47 -0.43 -0.52	34.29 34.45 34.51	1.16 1.51 2.90	2.00 1.23

СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В РАСТВОРЕННОЙ

Таблица 1. Продолжение

КИ	ИИ	М	М	I	_	Дата	°C	, %	ц,	ц
едиц	танці	130HT	бина,	ирота	JI TOTE	LTL	I-pa,	ность	C, MI,	C, MF
Эксп	Nē c	Lop	Глу	Π	Дс	дд.мм.	Темі	Соле	TO	DO
AMK81	6926	6	277	74.185	59.717	18.09.2020	5.11	31.43	1.56	2.09
AMK81	6926	14	277	74.185	59.717	18.09.2020	1.86	33.00	1.79	2.48
AMK81	6926	25	277	74.185	59.717	18.09.2020	-0.61	33.65	1.38	1.81
AMK81	6926	41	277	74.185	59.717	18.09.2020	-0.79	34.04	1.99	1.80
AMK81	6926	70	277	74.185	59.717	18.09.2020	-0.57	34.27	2.81	
AMK81	6926	99	277	74.185	59.717	18.09.2020	-0.50	34.37	1.35	
AMK81	6926	150	277	74.185	59.717	18.09.2020	-0.51	34.45	2.28	
AMK81	6926	200	277	74.185	59.717	18.09.2020	-0.48	34.51	1.36	
AMK81	6926	272	277	74.185	59.717	18.09.2020	-0.57	34.60	1.43	
AMK81	6927	0	370	73.249	58.735	19.09.2020	7.00	31.83	2.22	1.56
AMK81	6927	7	370	73.249	58.735	19.09.2020	6.93	32.37	2.06	
AMK81	6927	14	370	73.249	58.735	19.09.2020	6.81	32.39	1.56	
AMK81	6927	25	370	73.249	58.735	19.09.2020	-0.63	33.42	1.66	1.26
AMK81	6927	35	370	73.249	58.735	19.09.2020	-1.64	33.58	1.91	1.42
AMK81	6927	50	370	73.249	58.735	19.09.2020	-1.09	33.88	1.35	1.34
AMK81	6927	100	370	73.249	58.735	19.09.2020	-0.56	34.34	1.89	
AMK81	6927	200	370	73.249	58.735	19.09.2020	-0.47	34.52	1.51	
AMK81	6927	300	370	73.249	58.735	19.09.2020	-0.72	34.63	1.09	
AMK81	6927	363	370	73.249	58.735	19.09.2020	-0.83	34.66	1.18	1.08
AMK81	6928	2	255	71.215	57.885	20.09.2020	8.11	31.93	6.53	1.77
AMK81	6928	10	255	71.215	57.885	20.09.2020	8.12	31.93	2.53	
AMK81	6928	23	255	71.215	57.885	20.09.2020	5.15	33.30	1.96	1.85
AMK81	6928	34	255	71.215	57.885	20.09.2020	-1.08	33.61	3.92	1.64
AMK81	6928	60	255	71.215	57.885	20.09.2020	-0.92	34.20	1.46	
AMK81	6928	100	255	71.215	57.885	20.09.2020	-0.54	34.39	3.92	
AMK81	6928	200	255	71.215	57.885	20.09.2020	-0.57	34.54	3.75	0.95
AMK81	6928	249	255	71.215	57.885	20.09.2020	-0.68	34.58	1.99	
AMK83	7015	2	238	71.116	58.223	22.06.2021	1.46	32.72	0.66	0.64
AMK83	7015	12	238	71.116	58.223	22.06.2021	-1.28	33.37	0.60	0.87
AMK83	7015	25	238	71.116	58.223	22.06.2021	-1.74	33.78	0.54	0.80
AMK83	7015	42	238	71.116	58.223	22.06.2021	-1.74	33.93	0.54	0.68
AMK83	7015	60	238	71.116	58.223	22.06.2021	-1.18	34.18	0.56	
AMK83	7015	100	238	71.116	58.223	22.06.2021	-0.41	34.42	0.47	0.53
AMK83	7015	130	238	71.116	58.223	22.06.2021	-0.81	34.45	0.47	
AMK83	7015	180	238	71.116	58.223	22.06.2021	-0.92	34.52	0.46	
AMK83	7015	210	238	71.116	58.223	22.06.2021	-1.45	34.55	0.48	
AMK83	7015	232	238	71.116	58.223	22.06.2021	-1.72	34.71	0.59	0.67

Таблица 1. Продолжение

ви	ИИ	, W	W		I	Дата	°C	%,	ц	ц/
ДИЦ	ПНП	THO	іна,	pota	rot2	LL	pa,	OCTE	, MI,	, ML
спе	2 CT2	риз	ıy6ı	Ши	Цол	M.F	-шм	лено	0C	Q
ЭК	ž	Го	Ľ			М.Д.	Te	Co	F	
AMK83	7016	2	242	72.050	58.441	23.06.2021	0.98	33.03	1.38	1.45
AMK83	7016	5	242	72.050	58.441	23.06.2021	0.97	33.03	1.09	
AMK83	7016	12	242	72.050	58.441	23.06.2021	-0.64	33.12	1.81	1.05
AMK83	7016	20	242	72.050	58.441	23.06.2021	-1.35	33.55	1.33	1.06
AMK83	7016	35	242	72.050	58.441	23.06.2021	-1.75	33.80	0.92	0.66
AMK83	7016	50	242	72.050	58.441	23.06.2021	-1.81	33.86	0.56	
AMK83	7016	95	242	72.050	58.441	23.06.2021	-1.02	34.33	0.76	0.73
AMK83	7016	130	242	72.050	58.441	23.06.2021	-1.28	34.41	0.52	
AMK83	7016	180	242	72.050	58.441	23.06.2021	-1.43	34.51	0.82	0.71
AMK83	7016	240	242	72.050	58.441	23.06.2021	-1.67	34.65	0.85	0.66
AMK83	7017	2	180	73.009	60.184	23.06.2021	-0.10	32.88	0.78	0.66
AMK83	7017	10	180	73.009	60.184	23.06.2021	-0.09	32.87	0.90	0.99
AMK83	7017	20	180	73.009	60.184	23.06.2021	-1.12	32.99	1.05	0.80
AMK83	7017	27	180	73.009	60.184	23.06.2021	-1.35	33.50	0.77	0.69
AMK83	7017	40	180	73.009	60.184	23.06.2021	-1.13	34.01	0.74	0.66
AMK83	7017	60	180	73.009	60.184	23.06.2021	-1.08	34.34	0.59	
AMK83	7017	80	180	73.009	60.184	23.06.2021	-0.97	34.43	0.50	
AMK83	7017	120	180	73.009	60.184	23.06.2021	-1.42	34.46	0.80	
AMK83	7017	177	180	73.009	60.184	23.06.2021	-1.47	34.48	1.04	0.57
AMK83	7018	2	148	74.098	64.734	24.06.2021	-0.81	32.89	1.23	1.05
AMK83	7018	12	148	74.098	64.734	24.06.2021	-1.26	33.08	1.35	0.95
AMK83	7018	19	148	74.098	64.734	24.06.2021	-1.41	33.21	1.01	0.96
AMK83	7018	21	148	74.098	64.734	24.06.2021	-1.41	33.21	1.68	1.13
AMK83	7018	22	148	74.098	64.734	24.06.2021	-1.44	33.23	0.92	0.95
AMK83	7018	30	148	74.098	64.734	24.06.2021	-1.68	33.45	1.05	1.00
AMK83	7018	45	148	74.098	64.734	24.06.2021	-1.63	33.52	0.97	0.96
AMK83	7018	60	148	74.098	64.734	24.06.2021	-1.10	33.73	0.96	
AMK83	7018	100	148	74.098	64.734	24.06.2021	-0.05	34.07	0.67	
AMK83	7018	148	148	74.098	64.734	24.06.2021	0.02	34.20	0.64	0.49
AMK83	7019	2	268	74.835	68.001	25.06.2021	-0.37	33.18	1.45	1.66
AMK83	7019	6	268	74.835	68.001	25.06.2021	-0.38	33.17	1.42	
AMK83	7019	10	268	74.835	68.001	25.06.2021	-0.35	33.20	1.54	0.97
AMK83	7019	20	268	74.835	68.001	25.06.2021	-0.32	33.24	1.62	1.08
AMK83	7019	30	268	74.835	68.001	25.06.2021	-1.46	33.54	1.56	1.29
AMK83	7019	40	268	74.835	68.001	25.06.2021	-1.68	33.72	1.33	1.23
AMK83	7019	60	268	74.835	68.001	25.06.2021	-1.46	33.80	1.60	0.88
AMK83	7019	100	268	74.835	68.001	25.06.2021	-0.18	34.11	0.79	

СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В РАСТВОРЕННОЙ

Таблица 1. Продолжение

БУ	И	М	М	_		Дата	ç	%,	.5	ц,
ДИЦ	анц	онт,	ина,	рота	rota	LIT	.pa,	ость	, MI/	, MF/
спе	ē cT8	биз	тубı	Ши	Дол	[M.F]	-IIW	лен	QC	OC OC
Эĸ	Ž	Гс	L L			ДД.М	Те	Co	E	Д
AMK83	7019	140	268	74.835	68.001	25.06.2021	0.10	34.24	0.97	0.97
AMK83	7019	200	268	74.835	68.001	25.06.2021	-0.10	34.40	0.76	
AMK83	7019	267	268	74.835	68.001	25.06.2021	-0.30	34.51	1.21	0.89
AMK83	7020	2	151	75.650	72.301	26.06.2021	-1.53	32.95	1.17	1.24
AMK83	7020	6	151	75.650	72.301	26.06.2021	-1.61	32.97	1.18	
AMK83	7020	14	151	75.650	72.301	26.06.2021	-1.61	32.97	1.06	1.17
AMK83	7020	22	151	75.650	72.301	26.06.2021	-1.61	33.44	1.00	
AMK83	7020	35	151	75.650	72.301	26.06.2021	-1.64	33.58	1.08	1.40
AMK83	7020	50	151	75.650	72.301	26.06.2021	-1.66	33.71	0.90	
AMK83	7020	100	151	75.650	72.301	26.06.2021	-0.23	34.11	1.05	
AMK83	7020	145	151	75.650	72.301	26.06.2021	0.01	34.27	0.80	1.10
AMK83	7021	2	70	76.502	77.090	26.06.2021	-1.57	30.36	2.00	1.83
AMK83	7021	4	70	76.502	77.090	26.06.2021	-1.57	30.37	1.96	2.02
AMK83	7021	10	70	76.502	77.090	26.06.2021	-1.59	30.54	2.11	2.05
AMK83	7021	20	70	76.502	77.090	26.06.2021	-1.52	32.73	1.36	2100
AMK83	7021	30	70	76.502	77.090	26.06.2021	-1.65	33.15	1.28	1.22
AMK83	7021	40	70	76 502	77 090	26 06 2021	-1 52	33 41	113	
AMK83	7021	50	70	76 502	77 090	26 06 2021	-1.38	33.60	1.02	
AMK83	7021	60	70	76.502	77.090	26.06.2021	-0.77	33.93	0.94	0.95
11011100	/ 0 = 1			/ 010 02				00190		0190
AMK83	7023	2	85	77.509	78.929	27.06.2021	-1.44	31.34	1.81	1.46
AMK83	7023	5	85	77.509	78.929	27.06.2021	-1.55	31.40	1.96	
AMK83	7023	10	85	77.509	78.929	27.06.2021	-1.51	31.50	1.66	1.37
AMK83	7023	15	85	77.509	78.929	27.06.2021	-1.52	31.66	1.61	1.14
AMK83	7023	30	85	77.509	78.929	27.06.2021	-0.76	33.61	1.28	0.85
AMK83	7023	50	85	77.509	78.929	27.06.2021	-1.19	33.94	1.08	
AMK83	7023	81	85	77.509	78.929	27.06.2021	-0.61	34.30	1.02	0.87
AMK83	7025	2	407	76.768	70.871	28.06.2021	-0.06	34.25	0.90	0.92
AMK83	7025	10	407	76.768	70.871	28.06.2021	-0.18	34.30	0.85	0.81
AMK83	7025	20	407	76.768	70.871	28.06.2021	-0.32	34.32	0.90	0.84
AMK83	7025	30	407	76 768	70.871	28 06 2021	-0.34	34 33	0.78	
AMK83	7025	50	407	76 768	70 871	28 06 2021	-0.66	34 37	0.78	1.06
AMK83	7025	80	407	76 768	70 871	28 06 2021	-0.69	34 50	0.87	1.00
AMK83	7025	120	407	76 768	70 871	28 06 2021	-1.06	34.62	0.84	
AMK83	7025	160	407	76 768	70 871	28 06 2021	-0.93	34 71	0.77	
AMK83	7025	200	407	76 768	70 871	28 06 2021	-1 11	34.76	0.78	
AMK83	7025	300	407	76 768	70 871	28 06 2021	_0.99	34.81	0.78	0.73
AMK83	7025	404	407	76.768	70.871	28.06.2021	-0.93	34.81	0.71	0.76

Таблица 1. Продолжение

	ł	И	1			Лата	()	%		
кспедици	е станци	оризонт, м	лубина, м	Широта	Долгота	dM.FIFF	емп-ра, ∘ (леность,	ГОС, мг/л	00С, мг/л
Ю	4	Ľ				л.дд	É	CC	L '	Π
AMK83	7026	2	150	76.567	71.332	28.06.2021	0.12	34.31	0.84	0.81
AMK83	7026	5	150	76.567	71.332	28.06.2021	0.02	34.31	0.78	
AMK83	7026	10	150	76.567	71.332	28.06.2021	-0.13	34.32	0.79	
AMK83	7026	20	150	76.567	71.332	28.06.2021	-0.28	34.33	0.77	0.75
AMK83	7026	30	150	76.567	71.332	28.06.2021	-0.64	34.39	0.81	
AMK83	7026	50	150	76.567	71.332	28.06.2021	-0.71	34.42	0.74	0.74
AMK83	7026	70	150	76.567	71.332	28.06.2021	-1.00	34.46	0.74	
AMK83	7026	100	150	76.567	71.332	28.06.2021	-1.04	34.54	0.78	0.77
AMK83	7026	146	150	76.567	71.332	28.06.2021	-1.24	34.66	1.00	0.92
AMK83	7043	2	133	76 263	77 749	30.06.2021	1.08	32 45	1 39	1 15
AMK83	7043	10	133	76.263	72.749	30.06.2021	-0.87	32.45	1.57	1.15
AMK83	7043	25	133	76.263	72.749	30.06.2021	-0.75	33 30	1.07	0.95
AMK83	7043	35	133	76.203	72.74)	30.06.2021	-0.75	33.30	1.07	0.75
AMK83	7043	50	133	76.203	72.74)	30.06.2021	-0.15	33.81	1.12	0.01
AMK83	7043	50 65	133	76.203	72.74)	30.06.2021	-0.13	33.06	1.04	0.71
AMK83	7043	75	133	76.203	72.74)	30.06.2021	0.12	33.08	0.87	0.82
AMK03	7043	00	133	76.203	72.749	20.06.2021	-0.30	24.12	0.07	0.82
AMK83	7043	110	133	76.203	72.749	30.06.2021	-0.29	34.12	0.91	
AMK03	7043	120	133	76.203	72.749	20.06.2021	-0.42	34.23 24.40	0.93	0.76
AMK0J	7043	129	155	70.203	12.149	30.00.2021	-0.54	54.40	0.04	0.70
AMK89-2	7494	0	1652	82.228	78.486	29.09.2022	-1.73	32.33	1.11	1.09
AMK89-2	7494	10	1652	82.228	78.486	29.09.2022	-1.71	32.36	1.28	
AMK89-2	7494	20	1652	82.228	78.486	29.09.2022	-1.74	32.46	1.18	1.04
AMK89-2	7494	30	1652	82.228	78.486	29.09.2022	-1.48	34.05	1.01	1.51
AMK89-2	7494	40	1652	82.228	78.486	29.09.2022	-1.27	34.21	1.08	
AMK89-2	7494	70	1652	82.228	78.486	29.09.2022	1.67	34.76	1.09	
AMK89-2	7494	100	1652	82.228	78.486	29.09.2022	1.83	34.79	1.22	
AMK89-2	7494	210	1652	82.228	78.486	29.09.2022	2.29	34.89	1.03	1.16
AMK89-2	7494	300	1652	82.228	78.486	29.09.2022	1.96	34.88	1.03	
AMK89-2	7494	500	1652	82.228	78.486	29.09.2022	1.13	34.88	1.10	
AMK89-2	7494	800	1652	82.228	78.486	29.09.2022	0.29	34.91	0.70	
AMK89-2	7494	1100	1652	82.228	78.486	29.09.2022	-0.31	34.91	1.05	0.89
AMK89-2	7494	1550	1652	82.228	78.486	29.09.2022	-0.57	34.92	0.70	0.78
AMK89-2	7494	1648	1652	82.228	78.486	29.09.2022	-0.63	34.92	0.93	1.00
AMUZOO	7405	0	400	00.000	70.400	20.00.0000	1.0.4	22.50	1.50	1.02
AMK89-2	/495	0	490	82.083	/8.488	30.09.2022	-1.04	32.59	1.53	1.02
AMK89-2	/495	6	490	82.083	/8.488	30.09.2022	-1.00	32.60	1.14	
AMK89-2	7495	12	490	82.083	78.488	30.09.2022	-0.48	32.82	1.27	

Таблица 1. Продолжение

ВИ	ИІ	М	М	1		Дата	ç	, %	ц	ц,
ſИП)	ЯΠН	онт,	на,	00T8	TOTA	LL.	pa, "	CTb	MI/	ML/
Тел	ста	оизо	уби	Пир	пој	A.FT	-Ш	ено	ЭС,	oC,
Экс	No	Ioj	Ľ	П	Ц	ц.M.	Ten	ГоЛ	TC	Ď
			10.0			Ê.	0.40			
AMK89-2	7495	23	490	82.083	78.488	30.09.2022	0.13	33.23	1.00	1.10
AMK89-2	7495	40	490	82.083	78.488	30.09.2022	-0.11	34.07	1.01	
AMK89-2	7495	60	490	82.083	78.488	30.09.2022	-0.17	34.44	1.20	1.01
AMK89-2	7495	160	490	82.083	78.488	30.09.2022	0.76	34.78	1.01	0.04
AMK89-2	7495	240	490	82.083	78.488	30.09.2022	0.91	34.83	1.06	0.84
AMK89-2	7495	491	490	82.083	78.488	30.09.2022	-0.74	34.80	0.99	0.93
	7406	0	17(01 71(70.400	20.00.2022	0.06	22.21	1 01	1 1 4
AMK89-2	/496	0	1/0	81./10	/8.492	30.09.2022	0.06	33.21	1.21	1.14
AMK89-2	7496	8 20	1/0	81./10 01.716	78.492	30.09.2022	0.15	33.22	1.20	0.00
AMK89-2	7496	20	1/0	81./10 01.716	78.492	30.09.2022	0.07	33.10	1.10	0.98
AMK89-2	/496	30	1/6	81./10	/8.492	30.09.2022	0.34	34.11	1.26	
AMK89-2	/496	45	1/6	81./16	/8.492	30.09.2022	-0.61	34.51	1.34	0.00
AMK89-2	/496	60 100	1/6	81./16	/8.492	30.09.2022	-1.02	34.60	1.06	0.89
AMK89-2	7496	100	176	81.716	78.492	30.09.2022	-1.41	34.70	1.18	0.00
AMK89-2	/496	1/3	1/6	81./16	/8.492	30.09.2022	-1.46	34.72	1.05	0.99
AMK89-2	7498	0	196	80.899	81.654	01.10.2022	-1.64	31.76	1.12	1.18
AMK89-2	7498	12	196	80.899	81.654	01.10.2022	-1.52	31.94	1.11	1.49
AMK89-2	7498	20	196	80.899	81.654	01.10.2022	-0.06	33.88	0.98	1.21
AMK89-2	7498	30	196	80.899	81.654	01.10.2022	-0.25	34.41	1.33	
AMK89-2	7498	50	196	80.899	81.654	01.10.2022	-1.16	34.60	1.14	1.08
AMK89-2	7498	100	196	80.899	81.654	01.10.2022	-1.26	34.72	0.98	
AMK89-2	7498	193	196	80.899	81.654	01.10.2022	-1.36	34.74	0.90	1.44
AMK89-2	7499	0	233	80.302	82.799	01.10.2022	-1.60	32.13	1.02	1.01
AMK89-2	7499	10	233	80.302	82.799	01.10.2022	-1.50	32.95	1.05	
AMK89-2	7499	20	233	80.302	82.799	01.10.2022	-0.79	33.55	1.06	1.02
AMK89-2	7499	25	233	80.302	82.799	01.10.2022	-0.21	34.25	0.88	
AMK89-2	7499	40	233	80.302	82.799	01.10.2022	-1.23	34.56	0.98	
AMK89-2	7499	60	233	80.302	82.799	01.10.2022	-1.43	34.66	0.96	0.91
AMK89-2	7499	100	233	80.302	82.799	01.10.2022	-1.03	34.74	0.96	
AMK89-2	7499	230	233	80.302	82.799	01.10.2022	-1.34	34.76	0.87	0.87
AMK89-2	7500	0	83	79.732	83.038	01.10.2022	-1.25	32.51	1.15	0.93
AMK89-2	7500	12	83	79.732	83.038	01.10.2022	-1.10	32.55	1.12	
AMK89-2	7500	18	83	79.732	83.038	01.10.2022	-0.47	33.85	1.23	0.94
AMK89-2	7500	25	83	79.732	83.038	01.10.2022	-0.86	34.28	1.09	
AMK89-2	7500	40	83	79.732	83.038	01.10.2022	-1.23	34.46	1.11	
AMK89-2	7500	50	83	79.732	83.038	01.10.2022	-1.32	34.50	1.07	
AMK89-2	7500	81	83	79.732	83.038	01.10.2022	-1.50	34.55	1.12	0.85

Таблица 1. Окончание

ви	ИИ	W	M	а	r,	Дата	°C	%,	ц	ц/
кспедиц	Ф станц	оризонт	Лубина,	Широт	Долгота	MM. FFF	емп-ра,	оленостн	TOC, MI,	DOC, MI
Φ	~		Π			дд.	H	Ŭ		
AMK89-2	7501	0	292	79.266	87.635	02.10.2022	0.62	29.95	1.96	1.61
AMK89-2	7501	10	292	79.266	87.635	02.10.2022	0.68	29.99	1.83	
AMK89-2	7501	17	292	79.266	87.635	02.10.2022	1.61	32.33	1.43	
AMK89-2	7501	26	292	79.266	87.635	02.10.2022	-1.12	33.63	1.07	1.10
AMK89-2	7501	50	292	79.266	87.635	02.10.2022	-1.33	34.36	1.03	
AMK89-2	7501	70	292	79.266	87.635	02.10.2022	-1.32	34.47	1.08	
AMK89-2	7501	120	292	79.266	87.635	02.10.2022	-1.58	34.59	1.10	0.94
AMK89-2	7501	200	292	79.266	87.635	02.10.2022	-1.59	34.68	1.05	
AMK89-2	7501	286	292	79.266	87.635	02.10.2022	-1.62	34.72	1.04	0.96
AMK89-2	7502	0	230	78.599	88.072	02.10.2022	1.02	31.24	1.67	1.41
AMK89-2	7502	10	230	78.599	88.072	02.10.2022	1.01	31.62	1.84	
AMK89-2	7502	17	230	78.599	88.072	02.10.2022	2.03	32.29	1.42	1.11
AMK89-2	7502	25	230	78.599	88.072	02.10.2022	0.77	33.66	1.06	
AMK89-2	7502	40	230	78.599	88.072	02.10.2022	-0.46	34.08	1.22	0.98
AMK89-2	7502	70	230	78.599	88.072	02.10.2022	-1.23	34.32	0.94	
AMK89-2	7502	100	230	78.599	88.072	02.10.2022	-1.22	34.48	1.12	
AMK89-2	7502	227	230	78.599	88.072	02.10.2022	-1.60	34.68	0.98	0.91
AMK80-2	7503	0	104	78 015	88 673	03 10 2022	1.64	20 02	1 77	1.68
ΔMK89_2	7503	13	104	78.015	88.623	03.10.2022	1.04	30.01	1.77	1.00
ΔMK89_2	7503	17	104	78.015	88 623	03.10.2022	3.22	33.06	1.54	1 17
ΔMK89_2	7503	30	104	78.015	88 623	03.10.2022	-0.11	33.66	1.17	1.17
ΔMK89_2	7503	50	104	78.015	88 623	03.10.2022	-0.11	33.00	1.57	1.05
ΔMK89_2	7503	70	104	78.015	88 623	03.10.2022	-0.50	34.15	1.17	1.05
AMK89-2	7503	102	104	78.015	88 623	03 10 2022	-0.46	34.27	1.12	1.00
/1011(0) 2	1505	102	101	/0.015	00.025	03.10.2022	0.10	51.27	1.05	1.00
AMK89-2	7504	0	120	77.500	87.231	03.10.2022	1.84	29.30	1.94	1.77
AMK89-2	7504	14	120	77.500	87.231	03.10.2022	1.96	29.45	1.93	1.77
AMK89-2	7504	20	120	77.500	87.231	03.10.2022	0.89	32.65	1.39	
AMK89-2	7504	30	120	77.500	87.231	03.10.2022	-0.98	33.57	1.31	1.11
AMK89-2	7504	50	120	77.500	87.231	03.10.2022	-1.09	33.84	1.24	
AMK89-2	7504	117	120	77.500	87.231	03.10.2022	-0.76	34.15	1.18	1.14
		_								
AMK89-2	7505	0	72	76.969	87.676	03.10.2022	2.01	25.57	2.50	2.52
AMK89-2	7505	8	72	76.969	87.676	03.10.2022	2.40	26.14	2.30	2.32
AMK89-2	7505	15	72	76.969	87.676	03.10.2022	2.35	29.52	1.98	
AMK89-2	7505	20	72	76.969	87.676	03.10.2022	1.19	31.85	1.27	
AMK89-2	7505	30	72	76.969	87.676	03.10.2022	-0.95	33.41	1.08	1.14
AMK89-2	7505	50	72	76.969	87.676	03.10.2022	-1.07	33.74	1.26	
AMK89-2	7505	69	72	76.969	87.676	03.10.2022	-1.08	33.76	1.13	1.15

								1			r
Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л	Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л
AMK54	4946	0	23.1	н/о	0.34	AMK54	4984	75	47.8	н/о	
AMK54	4946	20		н/о	0.18	-					
AMK54	4946	30	29.2	н/о	0.17	AMK54	4988	0	70.9	н/о	0.32
AMK54	4946	70	32.0	н/о	0.34	AMK54	4988	20	72.4	н/о	0.27
AMK54	4946	138	27.5	н/о		AMK54	4988	30	67.3	н/о	
_						AMK54	4988	37	42.2	н/о	0.25
AMK54	4950	0	15.8	н/о	0.27	AMK54	4988	60			0.25
AMK54	4950	30	28.3	н/о	0.12	AMK54	4988	102	59.6	н/о	0.30
AMK54	4950	50	22.3	н/о	0.18	AMK54	4988	178	21.5	н/о	0.34
AMK54	4950	71	15.5	н/о	0.28		.,				
AMK54	4950	113	7.1	н/о	0.27	AMK54	4990	0	115.5	н/о	0.48
-						AMK54	4990	8	52.8	н/о	0.27
AMK54	4954	2	249.9	н/о	9.77	AMK54	4990	10	41.0	н/о	
AMK54	4954	14	435.0	н/о	15.95	AMK54	4990	20	30.6	н/о	0.23
				,		AMK54	4990	50	49.6	н/о	0.29
AMK54	4956	0	71.9	н/о	0.64	AMK54	4990	75	17.7	н/о	0.24
AMK54	4956	14	58.3	н/о	0.32	AMK54	4990	107	43.3	н/о	0.53
AMK54	4956	21	237.7	н/о	0.25						
AMK54	4956	32	9.9	н/о	1.92	AMK54	4993	0	920.3	н/о	23.13
				,		AMK54	4993	21	892.7	н/о	20.07
AMK54	4958	0	117.8	н/о	0.42						
AMK54	4958	15	51.2	н/о	0.30	AMK54	4994	0	1489.1	н/о	34.37
AMK54	4958	26	53.5	н/о	0.21	AMK54	4994	15	2404.7	н/о	80.80
AMK54	4958	55	49.8	н/о	0.57						
AMK54	4958	110	6.3	н/о	0.92	AMK54	4996	0	650.0	н/о	19.57
						AMK54	4996	2	177.9	н/о	3.82
AMK54	4960	0	14.5	н/о	0.60	AMK54	4996	15	643.6	н/о	14.65
AMK54	4960	18	17.0	н/о	0.20						
AMK54	4960	29	16.1	н/о	0.13	AMK54	4999	0	447.8	н/о	6.47
AMK54	4960	60	16.1	н/о	0.09	AMK54	4999	6	277.0	н/о	1.97
AMK54	4960	109	29.3	н/о	0.30	AMK54	4999	24	767.1	н/о	26.58
AMK54	4983	0	99.0	н/о	0.23	AMK54	5000	0	198.0	н/о	0.40
AMK54	4983	10	91.3	н/о		AMK54	5000	16	321.8	н/о	6.08
AMK54	4983	40	62.3	н/о	0.35	AMK54	5000	22	428.0	н/о	8.09
AMK54	4983	62	62.7	н/о	0.33						
AMK54	4983	200	17.2	н/о	0.18	AMK54	5001	0	117.7	н/о	0.32
AMK54	4983	528	106.1	н/о	4.30	AMK54	5001	12	57.1	н/о	0.19
AMK54	4984	0	59.6	н/о		AMK54	5001	22	217.0	н/о	8.40
AMK54	4984	10	76.6	н/о							

Таблица 2. Концентрации взвешенного органического (POC), неорганического (PIC) углерода и общей взвеси (PM) в Карском море

Таблица 2. Продолжение

Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л	Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л
AMK54	5002	0	110.4	н/о	0.56						
AMK54	5002	14	46.8	н/о	0.44	AMK59	5021	3	363.3	н/о	1.04
AMK54	5002	25	111.5	н/о	3.83	AMK59	5021	32	282.5	н/о	7.63
	5002		101.0	,	0.55		5022		110.0	,	0.02
AMK54	5003	0	121.2	Н/О	0.55	AMK59	5023		119.8	Н/О	0.82
AMK54	5003	10	70.1	Н/О	0.30	AMK59	5023	5	121.2	Н/О	0.83
AMK54	5003	14	/0.5	Н/О	0.70	AMK59	5023	22	83.2	Н/О	0.80
AMK54	5003	58	59.7	Н/О	0.78	AMK59	5023	27	127.0	Н/О	2.50
AMK54	5004	0	150.2	Н/О	0.43		5025		110 5	,	0.47
AMK54	5004	15	39.2	Н/О	0.20	AMK59	5025	0	118.5	Н/О	0.47
AMK54	5004	40	45.9	н/о	0.27	AMK59	5025	45	46.0	н/о	0.71
AMK54	5004	103	46.4	н/о	0.37						
A . A . K. 14. 50	5007		162.5	,	0.42	AMK59	5026		113.4	н/о	0.34
AMK59	5007	0	163.5	Н/О	0.43	AMK59	5026	6	79.6	Н/О	0.40
AMK59	5007	135	137.1	Н/О		AMK59	5026	20	64.6	Н/О	0.16
			1.50.0	,		AMK59	5026	60	45.0	н/о	0.38
AMK59	5010	0	152.2	н/о	0.44	AMK59	5028	1	140.9	н/о	0.82
AMK59	5010	5	95.8	н/о	0.31	AMK59	5028	8	103.3	н/о	0.65
AMK59	5010	10	141.1	н/о	0.35	AMK59	5028	20	44.2	н/о	0.19
AMK59	5010	20	81.8	н/о	0.58	AMK59	5028	38	104.3	н/о	0.90
AMK59	5010	28	149.3	н/о	2.06						
						AMK59	5029	2	52.3	н/о	0.24
AMK59	5011-2	0	311.1	н/о		AMK59	5029	8	56.5	н/о	0.31
AMK59	5011-2	5	237.5	н/о	1.27	AMK59	5029	51	62.7	н/о	0.92
AMK59	5011-2	12	223.6	н/о	0.51						
AMK59	5011-2	25	245.6	н/о	1.20	AMK59	5030	1	125.7	н/о	0.58
AMK59	5011-2	34	150.7	н/о	1.73	AMK59	5030	3	68.6	н/о	0.71
						AMK59	5030	14	59.2	н/о	0.21
AMK59	5013	0	393.6	н/о	2.55	AMK59	5030	38	131.4	н/о	0.90
AMK59	5013	28			3.95						
						AMK59	5032	2	71.8	н/о	0.28
AMK59	5014	2	407.2	н/о	2.93	AMK59	5032	16	43.7	н/о	0.29
AMK59	5014	8	186.8	н/о	1.81	AMK59	5032	40	37.3	н/о	0.17
						AMK59	5032	56	36.7	н/о	0.42
AMK59	5015	0	344.6	н/о	2.73						
AMK59	5015	12	566.8	н/о	10.31	AMK59	5033	3	79.3	н/о	0.31
						AMK59	5033	10	83.7	н/о	0.37
AMK59	5018	0	279.3	н/о	1.15	AMK59	5033	55	38.0	н/о	0.26
AMK59	5018	6	152.8	н/о	0.97	AMK59	5033	120	37.1	н/о	0.36
AMK59	5018	14	170.7	н/о	1.53						
AMK59	5018	20	367.0	н/о	5.53	AMK59	5034	1	73.7	н/о	0.26

СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В РАСТВОРЕННОЙ

Таблица 2. Продолжение

		1	r	r				r		1	,
Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л	Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л
AMK 59	5034	15	40.5	н/о	0.16	ПШ128	12807	12	145.4	н/о	
AMK 59	5034	110	38.2	н/о	0.22	ПШ120	12807	20	78.1	и/о	0.11
AMK 50	5034	215	63.2	п/о	0.22	ПШ120	12807	20	54.0		0.11
AMAJ	5054	215	05.2	п/О	0.55	ПШ120	12007	60	106.1	п/О	0.22
A M IZ 50	5020	1	(2.5	,	0.16	ПШ120	12807	00	100.1	Н/О	0.32
AMK 39	5039		03.5	Н/О	0.16	H 111100	10000		115 0	,	
AMK59	5039	20	49.4	H/O	0.29	ПШ128	12809	0	117.0	H/O	
AMK59	5039	150	31.2	н/о	0.31	ПШ128	12809	8	97.3	Н/О	
AMK59	5039	355	36.6	н/о	0.25	ПШ128	12809	17	94.6	н/о	
						ПШ128	12809	55	34.6	н/о	
AMK59	5042	1	65.8	н/о	0.15						
AMK59	5042	9	65.3	н/о	0.15	ПШ128	12811	0	84.6	н/о	0.20
AMK59	5042	35	43.0	н/о	0.13	ПШ128	12811	7	71.3	н/о	0.26
AMK59	5042	100	21.8	н/о	0.10	ПШ128	12811	30	118.4	н/о	
AMK59	5042	280			0.12	ПШ128	12811	30	80.0	н/о	0.36
AMK59	5042	460	33.6	н/о	0.27	ПШ128	12811	75	27.5	н/о	
						ПШ128	12811	95	20.2	н/о	0.15
AMK59	5044	2	124.5	н/о	0.35	ПШ128	12811	346	14.3	н/о	
AMK59	5044	4	120.2	н/о	0.28						
AMK59	5044	110	45.8	н/о	0.12	ПШ128	12816	0	75.2	н/о	
AMK59	5044	147	45.3	н/о	0.26	ПШ128	12816	0	152.4	н/о	
				,		ПШ128	12816	15	49.4	н/о	
AMK59	5045	7	77.2	н/о	0.13	ПШ128	12816	15	87.0	н/о	
AMK 59	5045	20	58.3	н/о	0.15	ПШ128	12816	30	118.4	н/о	
AMK 59	5045	100	34.0	н/о	0.13	1111120	12010		110.1		
AMK 59	5045	528	34.7	н/о	0.15	ПШ128	12818	0	1986 0	н/о	
ПШ128	12804	0	94.9	11/0	0.28	ПШ120	12818	14	2325.0	н/о	
ПШ120	12804	8	101.6	н/о	0.20	1111120	12010		2323.0	11/0	
ПШ120	12804	30	77.6	п/о	0.22	ПШ128	12820	0	383 7	и/о	
ПШ120	12804	80	30.4	п/о	0.22	ПШ120	12820	10	422.0		
ПШ120	12004	152	35.0	11/0	0.25	ПШ120	12020	16	913 1		
ПШ120	12004	132	55.9	н/О	0.29	ПШ120	12020	0	462.9	н/0	
TIII120	12005		115.2	/-		ПШ120	12024	10	403.0	H/O	
ПШ128	12805		115.5	Н/О		ПШ128	12824	10	182.5	Н/О	
ПШ128	12805	3	153.0	Н/О		ПШ128	12824	27	217.5	Н/О	
ПШ128	12805	10	/0.8	Н/О		H 111100	1000		150.0		
ПШ128	12805	20	109.0	н/о		ПШ128	12826	0	4/9.2	Н/О	
11Ш128	12805	35	51.2	н/о		ПШ128	12826	12	148.7	н/о	
ПШ128	12805	75	31.5	н/о							
ПШ128	12805	102	35.7	н/о		ПШ128	12832	0	125.2	н/о	
						ПШ128	12832	12	86.4	н/о	
ПШ128	12807	0	553.2	н/о							
ПШ128	12807	4	466.4	н/о	0.59	ПШ128	12833	12	68.9	н/о	

Таблица 2. Продолжение

Экспедиция	Nº станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л	Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л
ПШ128	12833	46	59.0	н/о							
						AMK66	5309	0	113.1	н/о	0.25
ПШ128	12841	0	90.3	н/о		AMK66	5309	12	20.1	н/о	0.15
ПШ128	12841	17	95.9	н/о		AMK66	5309	30	185.3	н/о	2.18
ПШ128	12841	120	21.7	н/о							
						AMK66	5310	0	440.5	н/о	2.28
ПШ128	12844	38	51.8	н/о		AMK66	5310	12	236.5	н/о	0.77
H 11120	10054		(0.2	1.0		AMK66	5310	28	438.3	н/о	2.02
ПШ128	12854	0	68.3	1.2			5011		240.2	,	1.00
ПШ128	12854	18	53.3	Н/О		AMK66	5311	0	349.3	Н/О	1.00
ПШ128	12854	109	68.8	Н/О		AMK66	5311	16	157.7	Н/О	0.75
H 11120	10071		57.0	,		AMK66	5311	25	134.9	Н/О	1.29
ПШ128	128/1	0	57.9	H/O		AMRCC	5212		(20)	/-	2 1 2
ПШ128	128/1	10	05.0	H/O		AMK00	5313	12	030.0	H/O	3.13
ПШ128	128/1	33	105.0	H/O		AMK00	5313	13	400.2	H/O	1.55
ПШ128	128/1	224	14.4	H/O		AMK00	5515	20	182.7	Н/О	0.81
ПШ128	128/1	234	33.1	Н/О		AMVCC	5215	0			2.04
AMK66	5202	0	886	11/0	0.20	AMK60	5315 5215	25			2.94
AMV66	5202	20	00.0	H/0	0.29	AMK00	5515	23			1.92
AMK66	5302	20	141.5	н/о	0.20	AMK66	5220	0	1277 2	11/0	6.87
AMK66	5302	55 70	22.2	н/о и/о	0.35	AMK66	5220	10	1577.5	н/о	0.82
AMK66	5302	87	32.2	н/0	0.14	AWIKUU	5520	10	1032.0	н/О	10.97
AMIKUU	5502	07	55.2	н/О	0.20	AMK66	5324	0	967.6	н/о	1/ 31
4 MK 66	5304	0	44 1	ч/о	0.12	AMK66	5324	15	745.9	п/о	13.72
AMK66	5304	17	71.4	н/о	0.12	7 1111100	5524	15	7-13.9	11/0	13.72
AMK66	5304	49	148.9	н/о	0.12	AMK66	5323-2	0	2593 3	104.0	106 35
AMK66	5304	120	29.4	н/о	0.12	AMK66	5323-2	16	2133.3	63.1	11 12
AMK66	5304	189	36.1	н/о	0.27	11011100	0020 2	10	2100.0	00.1	11.12
				7 -		AMK66	5321-2	0	835.5	20.4	9.79
AMK66	5306	0	80.5	н/о	0.16	AMK66	5321-2	11	727.0	н/о	27.19
AMK66	5306	15		7 -	0.19						
AMK66	5306	31	39.9	н/о	0.13	AMK66	5326	5	1184.0	н/о	5.53
AMK66	5306	60	44.9	, н/о	0.13					,	
AMK66	5306	135	40.1	н/о	0.16	AMK66	5319-2	0	1378.9	н/о	9.05
AMK66	5306	146	52.0	н/о	0.22	AMK66	5319-2	19	497.8	н/о	16.15
AMK66	5308	0	46.4	н/о	0.26						
AMK66	5308	35	54.8	н/о	0.17	AMK66	5327	0	832.7	н/о	9.34
AMK66	5308	80	31.7	0.9	0.37	AMK66	5327	12	898.7	н/о	8.76
AMK66	5308	165	34.9	н/о	0.21						
AMK66	5308	207	19.2	н/о	0.15	AMK66	5318-2	0	1197.5	н/о	9.04

СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В РАСТВОРЕННОЙ

Таблица 2. Продолжение

Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л	Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л
AMK66	5318-2	7	218.5	н/о	1.49	AMK66	5350	18	132.6	н/о	3.32
AMK66	5318-2	18	255.3	н/о	7.86		50.51		2044	,	0.00
AMV((5215 0	0	7612	20.2	2.04		5351 5251	0	286.6	H/O	0.30
	5215-2	25	/04.3	29.3 19.6	2.94	AMK60	5251	12	04.1	11/0	0.20
AMK00	5515-2	23	1/1.1	16.0	1.92	AMINOO	5551	40	94.1	н/о	2.09
AMK66	5330-2	0	1762.7	н/о	6.07	AMK66	5352	0	157.9	н/о	2.20
AMK66	5330-2	16	746.5	н/о	26.42	AMK66	5352	5	76.5	н/о	0.23
						AMK66	5352	38	134.2	н/о	0.65
AMK66	5343	9			35.08						
AMK66	5345	0			1.81	AMK66	5353	0			0.18
AMK66	5345	19			7.96	AMK66	5353	20	89.9	н/о	0.12
						AMK66	5353	48	85.6	н/о	0.87
AMK66	5344_2	0	144.2	н/о	2.12	AMK66	5353	60			1.65
AMK66	5344_2	8			2.45						
						AMK66	5306_2	0	64.0	0.6	0.15
AMK66	5342_2	0	261.3	н/о	1.54	AMK66	5306_2	35	134.8	5.4	0.30
AMK66	5342_2	10	557.5	н/о	19.00	AMK66	5306_2	80	36.5	0.5	0.12
						AMK66	5306_2	148	39.5	2.1	0.22
AMK66	5340-2	0	319.2	н/о	0.98	AMK66	5356_2	4	51.0	н/о	0.24
AMK66	5340-2	9	276.8	н/о	4.69	AMK66	5356_2	27	53.2	н/о	0.16
AMK66	5340-2	13	484.6	н/о	11.99	AMK66	5356_2	60	60.3	н/о	0.13
	5220 2	0	250.0	,	1 17	AMK66	5356_2	162	38.7	н/о	0.05
AMK66	5339_2	0	359.8	Н/О	1.1/	AMK66	5356_2	1/4			0.25
AMK60	5339_2	9	1/1.0	Н/О	1./4	AMRCC	5254 2	0	72.2	/-	0.24
AMK00	5339_2	21	183.4	H/O	4.30	AMKOO	5354_2 5254_2	20	/3.3	H/O	0.24
AMV66	5227 3	0	2246	11/0	0.40		5354_2	30 80	83.2 29 7	H/0	0.13
	5337_2	11	234.0 110.0	н/о	1.00	AMK66	5354_2 5354_2	174	30.7 /3.0	н/о ц/о	0.12
AMK66	5337_2	28	119.9	н/о	1.99	AWIKUU	5554_2	1/4	43.9	н/о	0.38
AWIX00	5557_2	20	105.0	п/О	, .10	AMK66	5304 2	0	68 3	п/О	0.13
AMK66	5335 2	0	268.6	н/о	0.63	AMK66	5304_2	18	65.5	н/о	0.15
AMK66	5335_2	10	37.7	н/о	0.05	AMK66	5304 2	110	32.0	н/о	0.13
AMK66	5335 2	29	99.3	н/о	3.17	AMK66	5304 2	194	50.8	н/о	0.13
11011100	55555 <u></u> 2		<i>yy</i> .0	11/0	5.17	11011100	5501_2	171	20.0	11/0	0.02
AMK66	5333_2	0	198.6	н/о	0.39	AMK66	5380	0	141.0	н/о	1.03
AMK66	5333_2	6	283.7	н/о	0.95	AMK66	5380	28	33.4	0.8	0.20
AMK66	5333_2	28	186.1	н/о	4.26	AMK66	5380	117	25.5	н/о	0.17
AMK66	5350	0	257.5	н/о	0.46	AMK66	5391	0	58.1	н/о	0.24
AMK66	5350	7	245.6	н/о	0.82	AMK66	5391	14	90.6	н/о	

Таблица 2. Продолжение

Bit Bit Bit Bit Bit Bit Bit Bit Bit Bit												
AMK66 5391 114 53.2 H/o 0.87 NN18 HH18-07 0 612.5 H/o 1.45 AMK66 5392 0 73.9 H/o 0.15 NN18 HH18-00 0 612.5 H/o 1.20 AMK66 5392 13 69.5 H/o 0.20 NN18 HH18-10 90.468.7 119.0 2.21 AMK66 5392 130 21.0 H/o 0.17 NN18 HH18-10 90.448.7 H/o 2.84 AMK66 5392 130 31.5 H/o 0.31 NN18 HH18-11 0 403.4 H/o 2.24 AMK66 5392 310 31.4.3 H/o 1.40 NN18 HH18-10 242.8 H/o 2.44 NN16 NN16-07 0 219.2 H/o 0.55 NN18 HH18-15 0 283.6 H/o 2.25 NN16 NN16-14 141.0 H/o NN18 <td>Экспедиция</td> <td>№ станции</td> <td>Глубина, м</td> <td>РОС, мкг/л</td> <td>РІС, мкг/л</td> <td>РМ, мг/л</td> <td>Экспедиция</td> <td>№ станции</td> <td>Глубина, м</td> <td>РОС, мкг/л</td> <td>РІС, мкг/л</td> <td>РМ, мг/л</td>	Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л	Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л
NNRG0 D31 Iv D33 Iv D33 Iv D33 Iv D33 Iv D33 D34 D43 D43 <thd43< th=""> <thd44< th=""> <thd44< th=""></thd44<></thd44<></thd43<>	AMK66	5391	114	53.2	ц/о	0.87	NN18	HH18-07	0	612.5	ц/о	1 45
AMK66 5392 0 73.9 µ/o 0.15 NNI8 HH18-00 0 468.7 119.0 2.21 AMK66 5392 35 69.5 µ/o 0.20 NN18 HH18-0 0 941.9 µ/o 2.84 AMK66 5392 130 21.0 µ/o 0.31 NN18 HH18-10 0 403.4 µ/o 5.04 AMK66 5392 310 31.5 µ/o 0.31 NN18 HH18-11 0 403.4 µ/o 5.04 NN16 NN16-01 0 62.4 µ/o NN18 HH18-15 0 232.8 µ/o 2.44 NN16 NN16-04 0 19.9 µ/o 0.55 NN18 HH18-17 0 428.9 µ/o 2.68 NN16 NN16-07 0 19.9 µ/o 0.55 NN18 HH18-16 0 428.9 µ/o 2.68 NN16 NN16-14 0 168.4 </td <td>7 1111100</td> <td>5571</td> <td>111</td> <td>55.2</td> <td>11/0</td> <td>0.07</td> <td>NN18</td> <td>HH18-08</td> <td>0</td> <td>187.0</td> <td>п/о</td> <td>1.15</td>	7 1111100	5571	111	55.2	11/0	0.07	NN18	HH18-08	0	187.0	п/о	1.15
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	AMK66	5392	0	73.9	н/о	0.15	NN18	HH18-09	0	468 7	119.0	2 21
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	AMK66	5392	35	69.5	н/о	0.15	NN18	HH18-10	0	941.9	н/о	2.21
NNIGO 1552 165 170 6.17 18113 1113 <th< td=""><td></td><td>5392</td><td>130</td><td>21.0</td><td>п/о</td><td>0.20</td><td>NN18</td><td>HH18-11</td><td>0</td><td>403.4</td><td>п/о</td><td>5.04</td></th<>		5392	130	21.0	п/о	0.20	NN18	HH18-11	0	403.4	п/о	5.04
NNIG NNIG <th< td=""><td>AMK66</td><td>5392</td><td>310</td><td>31.5</td><td>п/о</td><td>0.17</td><td>NN18</td><td>HH18-12</td><td>0</td><td>3/8 0</td><td>п/о</td><td>1.86</td></th<>	AMK66	5392	310	31.5	п/о	0.17	NN18	HH18-12	0	3/8 0	п/о	1.86
NNI6 NNI6-01 0 62.4 μ/o NNI8 HIH8-14 0 22.2.6 μ/o 2.4.3 NNI6 NNI6-03 0 134.3 μ/o 1.40 NNI8 HH18-15 0 22.6.6 μ/o 2.25 NNI6 NNI6-04 0 159.9 μ/o 0.55 NNI8 HH18-15 0 283.6 μ/o 2.25 NNI6 NNI6-04 0 159.9 μ/o 0.55 NNI8 HH18-16 0 490.7 μ/o 2.68 NNI6 NNI6-08 168.4 μ/o NN18 HH18-19 0 494.1 μ/o 1.05 NNI6 NNI6-14 0 125.7 μ/o NN18 HH18-20 0 228.7 μ/o 0.70 NNI6 NNI6-18 0 135.7 H/o NN18 HH18-21 0 218.0 μ/o 0.63 NN16 NN16-21 0 62.5 H/o NN18 <td>AMIKUU</td> <td>5572</td> <td>510</td> <td>51.5</td> <td>п/О</td> <td>0.51</td> <td>NN18</td> <td>HH18-13</td> <td>0</td> <td>372.8</td> <td>п/О</td> <td>4.63</td>	AMIKUU	5572	510	51.5	п/О	0.51	NN18	HH18-13	0	372.8	п/О	4.63
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	NN16	NN16-01	0	62.4	н/о		NN18	HH18-14	0	272.6	п/О	7.05 2.44
NN16 NN16-04 O 154.5 H/O 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 1.40 N16 NN16 NN16-04 0 1.55 NN18 HH18-16 0 428.9 H/O 2.68 NN16 NN16-04 0 168.4 H/O NN18 HH18-19 0 494.1 H/O 1.05 NN16 NN16-14 0 141.0 H/O NN18 HH18-19 0 494.1 H/O 1.93 NN16 NN16-18 0 135.7 H/O NN18 HH18-21 0 218.0 H/O 0.53 NN16 NN16-12 0 75.9 H/O 1.00 NN18 HH18-23 0 164.8 H/O 0.43 NN16 NN16-21 0 662.5 H/O NM6 AMK76 6221 13	NN16	$NN16_03$	0	13/13	п/О	1.40	NN18	HH18-15	0	272.0	п/о	2.77
NN16 NN16-07 0 139.5 H/0 5.03 NN16 IIII18-10 0 428.9 H/0 2.50 NN16 NN16-07 0 219.2 H/0 5.04 NN18 HII18-17 0 428.9 H/0 2.68 NN16 NN16-14 0 141.0 H/0 NN18 HH18-19 0 428.9 H/0 1.05 NN16 NN16-16 0 12.8 H/0 NN18 HH18-19 0 494.1 H/0 1.93 NN16 NN16-18 0 135.7 H/0 NN18 HH18-21 0 218.0 H/0 0.70 NN16 NN16-19 0 78.8 H/0 NN18 HH18-21 0 263.2 H/0 0.42 NN16 NN16-21 0 662.5 H/0 NN18 HH18-24 0 263.2 H/0 0.43 NN16 NN16-22 0 43.4 H/0 AMK76 6221 <	NN16	NN16 04	0	150.0	н/о	0.55	NINIO NINIIQ	UU10 16	0	203.0	н/о	2.23
NN16 NN16-07 0 219.2 H/0 3.04 NN16 NN16 H/0 2.05 NN16 NN16-08 0 168.4 H/0 NN18 HH18-18 0 458.2 H/0 1.05 NN16 NN16-14 0 141.0 H/0 NN18 HH18-19 0 494.1 H/0 1.93 NN16 NN16-18 0 135.7 H/0 NN18 HH18-20 0 228.7 H/0 0.70 NN16 NN16-19 0 78.8 H/0 NN18 HH18-21 0 218.0 H/0 0.53 NN16 NN16-20 0 75.9 H/0 1.00 NN18 HH18-23 0 164.8 H/0 0.42 NN16 NN16-21 0 662.5 H/0 NN16 NN16 <t< td=""><td>ININIO NINII6</td><td>NN16 07</td><td>0</td><td>210.2</td><td>н/о и/о</td><td>0.33</td><td>ININIO NINIIO</td><td>ПП10-10 ЦЦ10 17</td><td>0</td><td>490.7</td><td>H/0</td><td>5.90 2.60</td></t<>	ININIO NINII6	NN16 07	0	210.2	н/о и/о	0.33	ININIO NINIIO	ПП10-10 ЦЦ10 17	0	490.7	H/0	5.90 2.60
NN16 NN16 NN16 NN16 NN16 NN16 H/0 NN16 NN16 H/0 103.4 H/0 103 NN16 NN16-14 0 141.0 H/0 NN18 HH18-19 0 435.2 H/0 1.93 NN16 NN16-16 0 12.8 H/0 NN18 HH18-19 0 228.7 H/0 0.70 NN16 NN16-18 0 135.7 H/0 NN18 HH18-21 0 218.0 H/0 0.80 NN16 NN16-19 0 78.8 H/0 NN18 HH18-21 0 263.2 H/0 0.42 NN16 NN16-21 0 662.5 H/0 NN18 HH18-23 0 164.8 H/0 0.43 NN16 NN16-23 0 45.4 H/0 AMK76 6221 13 77.3 H/0 NN16 NN16-25 0 100.4 H/0 AMK76 6221 28 72.9 <td>ININIO NINIIC</td> <td>NN16 00</td> <td>0</td> <td>219.2</td> <td>H/O</td> <td>5.04</td> <td>ININIO NINIIO</td> <td>ПП10-1/</td> <td>0</td> <td>420.9</td> <td>H/O</td> <td>2.00</td>	ININIO NINIIC	NN16 00	0	219.2	H/O	5.04	ININIO NINIIO	ПП10-1/	0	420.9	H/O	2.00
NN16 NN16 IN16 II II II II III III III III III III IIII IIII IIII IIII IIIII IIIII IIIIII IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII	ININIO NINII(ININIO-U8	0	108.4	H/0		IN IN 10 NIN 10		0	438.2	H/O	1.05
NN16 NN16-18 0 12.8 H/0 NN18 HH18-20 0 228.7 H/0 0.70 NN16 NN16-18 0 135.7 H/0 NN18 HH18-21 0 218.0 H/0 0.80 NN16 NN16-19 0 78.8 H/0 NN18 HH18-22 0 97.9 H/0 0.53 NN16 NN16-20 0 75.9 H/0 1.00 NN18 HH18-23 0 164.8 H/0 0.42 NN16 NN16-21 0 662.5 H/0 NN18 HH18-23 0 164.8 H/0 0.42 NN16 NN16-22 0 45.4 H/0 AMK76 6221 0 60.3 H/0 NN16 NN16-23 0 45.4 H/0 AMK76 6221 13 77.3 H/0 NN16 NN16-25 0 100.4 H/0 AMK76 6221 42 70.9 H/0	ININIO NINIIC	NN10-14	0	141.0	H/O		IN IN 10 NIN 10	ПП18-19	0	494.1	H/O	1.95
NN16 NN16-18 0 153.7 H/0 NN18 HH18-21 0 218.0 H/0 0.80 NN16 NN16-19 0 78.8 H/0 NN18 HH18-22 0 97.9 H/0 0.53 NN16 NN16-19 0 75.9 H/0 1.00 NN18 HH18-22 0 97.9 H/0 0.53 NN16 NN16-21 0 662.5 H/0 NN18 HH18-23 0 164.8 H/0 0.43 NN16 NN16-21 0 63.4 H/0 AMK76 6221 0 60.3 H/0 NN16 NN16-23 0 45.4 H/0 0.26 AMK76 6221 13 77.3 H/0 NN16 NN16-23 0 45.4 H/0 AMK76 6221 28 72.3 H/0 NN16 NN16-25 0 100.4 H/0 0.76 AMK76 6221 28 79.3 H/0	ININIO NINII(ININIO-10	0	12.8	H/0		IN IN 10	ПП18-20	0	228.7	H/O	0.70
NN16 NN16-19 0 78.8 H/0 NN18 HH18-22 0 9.9.9 H/0 0.53 NN16 NN16-20 0 75.9 H/0 1.00 NN18 HH18-22 0 164.8 H/0 0.42 NN16 NN16-21 0 662.5 H/0 NN18 HH18-22 0 263.2 H/0 0.43 NN16 NN16-22 0 43.7 H/0 AMK76 6221 0 60.3 H/0 0.43 NN16 NN16-23 0 45.4 H/0 0.26 AMK76 6221 13 77.3 H/0 NN16 NN16-23 0 63.4 H/0 0.26 AMK76 6221 28 72.3 H/0 NN16 NN16-25 0 100.4 H/0 0.76 AMK76 6221 42 70.9 H/0 0.15 NN17 NN17-01 0 51.7 H/0 0.56 AMK76 6222	NNI6	NN10-18	0	135./	Н/О		NNI8	HH18-21	0	218.0	Н/О	0.80
NN16 NN16-20 0 7.5.9 H/o 1.00 NN18 HH18-23 0 164.8 H/o 0.42 NN16 NN16-21 0 662.5 H/o NN18 HH18-24 0 263.2 H/o 0.43 NN16 NN16-22 0 43.7 H/o AMK76 6221 0 60.3 H/o 0.43 NN16 NN16-22 0 45.4 H/o 0.26 AMK76 6221 0 60.3 H/o NN16 NN16-23 0 45.4 H/o 0.26 AMK76 6221 13 77.3 H/o NN16 NN16-25 0 100.4 H/o AMK76 6221 42 70.9 H/o NN16 NN16-27 0 260.0 H/o 0.76 AMK76 6221 40 69.3 H/o 0.15 NN17 NN17-01 0 51.7 H/o 0.56 AMK76 6222 15	NNI6	NN16-19	0	/8.8	Н/О	1.00	NNI8	HH18-22	0	97.9	Н/О	0.53
NN16 NN16-21 0 662.5 H/o NN18 HH18-24 0 263.2 H/o 0.43 NN16 NN16-22 0 43.7 H/o AMK76 6221 0 60.3 H/o NN16 NN16-23 0 45.4 H/o 0.26 AMK76 6221 13 77.3 H/o NN16 NN16-25 0 100.4 H/o AMK76 6221 28 72.3 H/o NN16 NN16-26 0 63.6 H/o AMK76 6221 42 70.9 H/o NN16 NN16-27 0 260.0 H/o 0.76 AMK76 6222 0 89.3 H/o 0.15 NN17 NN17-01 0 51.7 H/o 0.56 AMK76 6222 15 93.7 H/o 0.10 NN17 NN17-08 0 30.9 1.5 0.28 AMK76 6222 29 120.5 H/o	NNI6	NN16-20	0	75.9	н/о	1.00	NNI8	HH18-23	0	164.8	н/о	0.42
NN16 NN16-22 0 43.7 H/O AMK76 6221 0 60.3 H/O NN16 NN16-23 0 45.4 H/O 0.26 AMK76 6221 13 77.3 H/O NN16 NN16-24 0 63.4 H/O 0.26 AMK76 6221 13 77.3 H/O NN16 NN16-25 0 100.4 H/O AMK76 6221 28 72.3 H/O NN16 NN16-27 0 260.0 H/O 0.76 AMK76 6221 42 70.9 H/O NN17 NN17-01 0 51.7 H/O 0.56 AMK76 6222 0 89.3 H/O 0.15 NN17 NN17-03 0 42.6 1.5 0.50 AMK76 6222 22 89.2 H/O 0.19 NN17 NN17-08 0 30.9 1.5 0.28 AMK76 6222 29 120.5 <t< td=""><td>NN16</td><td>NN16-21</td><td>0</td><td>662.5</td><td>н/о</td><td></td><td>NNI8</td><td>HH18-24</td><td>0</td><td>263.2</td><td>н/о</td><td>0.43</td></t<>	NN16	NN16-21	0	662.5	н/о		NNI8	HH18-24	0	263.2	н/о	0.43
NN16 NN16-23 0 45.4 H/o AMK76 6221 0 60.3 H/o NN16 NN16-24 0 63.4 H/o 0.26 AMK76 6221 13 77.3 H/o NN16 NN16-25 0 100.4 H/o AMK76 6221 28 72.3 H/o NN16 NN16-26 0 63.6 H/o AMK76 6221 42 70.9 H/o NN16 NN16-27 0 260.0 H/o 0.76 AMK76 6221 60 66.3 H/o NN17 NN17-01 0 51.7 H/o 0.56 AMK76 6222 0 89.3 H/o 0.15 NN17 NN17-03 0 42.6 1.5 0.50 AMK76 6222 22 89.2 H/o 0.19 NN17 NN17-08 0 30.9 1.5 0.28 AMK76 6222 50 51.8 H/o	NN16	NN16-22	0	43.7	н/о					<i></i>		
NN16 NN16-24 0 63.4 H/o 0.26 AMK76 6221 13 77.3 H/o NN16 NN16-25 0 100.4 H/o AMK76 6221 28 72.3 H/o NN16 NN16-25 0 63.6 H/o AMK76 6221 42 70.9 H/o NN16 NN16-27 0 260.0 H/o 0.76 AMK76 6221 60 66.3 H/o NN17 NN17-01 0 51.7 H/o 0.56 AMK76 6222 0 89.3 H/o 0.15 NN17 NN17-03 0 42.6 1.5 0.50 AMK76 6222 22 89.2 H/o 0.19 NN17 NN17-08 0 30.9 1.5 0.28 AMK76 6222 29 120.5 H/o 0.18 NN17 NN17-09 0 70.7 H/o 1.78 AMK76 6222 50 <	NN16	NN16-23	0	45.4	н/о		AMK76	6221	0	60.3	н/о	
NN16 NN16-25 0 100.4 H/o AMK76 6221 28 72.3 H/o NN16 NN16-26 0 63.6 H/o AMK76 6221 42 70.9 H/o NN16 NN16-27 0 260.0 H/o 0.76 AMK76 6221 60 66.3 H/o NN17 NN17-01 0 51.7 H/o 0.56 AMK76 6222 0 89.3 H/o 0.15 NN17 NN17-03 0 42.6 1.5 0.50 AMK76 6222 2 89.3 H/o 0.10 NN17 NN17-08 0 30.9 1.5 0.28 AMK76 6222 29 120.5 H/o 0.18 NN17 NN17-09 0 70.7 H/o 1.78 AMK76 6222 50 51.8 H/o 0.18 NN17 NN17-10 0 307.2 H/o 1.811 - - -	NN16	NN16-24	0	63.4	н/о	0.26	AMK76	6221	13	77.3	н/о	
NN16 NN16-26 0 63.6 H/o AMK76 6221 42 70.9 H/o NN16 NN16-27 0 260.0 H/o 0.76 AMK76 6221 60 66.3 H/o NN17 NN17-01 0 51.7 H/o 0.56 AMK76 6222 0 89.3 H/o 0.15 NN17 NN17-03 0 42.6 1.5 0.50 AMK76 6222 15 93.7 H/o 0.10 NN17 NN17-06 0 42.6 1.7 0.64 AMK76 6222 22 89.2 H/o 0.19 NN17 NN17-08 0 30.9 1.5 0.28 AMK76 6222 29 120.5 H/o 0.18 NN17 NN17-09 0 70.7 H/o 1.78 AMK76 6222 50 51.8 H/o 0.18 NN17 NN17-10 0 307.2 H/o 1.61	NN16	NN16-25	0	100.4	н/о		AMK76	6221	28	72.3	н/о	
NN16 NN16-27 0 260.0 H/o 0.76 AMK76 6221 60 66.3 H/o NN17 NN17-01 0 51.7 H/o 0.56 AMK76 6222 0 89.3 H/o 0.15 NN17 NN17-03 0 42.6 1.5 0.50 AMK76 6222 15 93.7 H/o 0.10 NN17 NN17-06 0 42.6 1.7 0.64 AMK76 6222 22 89.2 H/o 0.19 NN17 NN17-08 0 30.9 1.5 0.28 AMK76 6222 29 120.5 H/o 0.18 NN17 NN17-09 0 70.7 H/o 1.78 AMK76 6222 50 51.8 H/o 0.07 NN17 NN17-10 0 307.2 H/o 1.811 0 65.5 H/o 0.09 NN17 NN17-11 0 483.2 H/o	NN16	NN16-26	0	63.6	н/о		AMK76	6221	42	70.9	н/о	
NN17 NN17-01 0 51.7 H/o 0.56 AMK76 6222 0 89.3 H/o 0.15 NN17 NN17-03 0 42.6 1.5 0.50 AMK76 6222 15 93.7 H/o 0.10 NN17 NN17-06 0 42.6 1.7 0.64 AMK76 6222 22 89.2 H/o 0.19 NN17 NN17-08 0 30.9 1.5 0.28 AMK76 6222 29 120.5 H/o 0.18 NN17 NN17-09 0 70.7 H/o 1.78 AMK76 6222 50 51.8 H/o 0.07 NN17 NN17-10 0 307.2 H/o 7.33 AMK76 6222 83 45.4 H/o 0.18 NN17 NN17-11 0 483.2 H/o 18.11 0 65.5 H/o 0.09 NN17 NN17-13 0 82.0	NN16	NN16-27	0	260.0	н/о	0.76	AMK76	6221	60	66.3	н/о	
NN17 NN17-03 0 42.6 1.5 0.50 AMK76 6222 15 93.7 H/0 0.10 NN17 NN17-06 0 42.6 1.7 0.64 AMK76 6222 22 89.2 H/0 0.19 NN17 NN17-08 0 30.9 1.5 0.28 AMK76 6222 29 120.5 H/0 0.18 NN17 NN17-09 0 70.7 H/0 1.78 AMK76 6222 50 51.8 H/0 0.07 NN17 NN17-10 0 307.2 H/0 7.33 AMK76 6222 83 45.4 H/0 0.18 NN17 NN17-11 0 483.2 H/0 18.11	NN17	NN17-01	0	51.7	н/о	0.56	AMK76	6222	0	89.3	н/о	0.15
NN17 NN17-06 0 42.6 1.7 0.64 AMK76 6222 22 89.2 H/o 0.19 NN17 NN17-08 0 30.9 1.5 0.28 AMK76 6222 29 120.5 H/o 0.18 NN17 NN17-09 0 70.7 H/o 1.78 AMK76 6222 50 51.8 H/o 0.07 NN17 NN17-10 0 307.2 H/o 7.33 AMK76 6222 83 45.4 H/o 0.18 NN17 NN17-10 0 307.2 H/o 1.811 0.18 NN17 NN17-11 0 483.2 H/o 1.61 AMK76 6224 0 65.5 H/o 0.09 NN17 NN17-13 0 82.0 H/o 0.21 AMK76 6224 20 131.4 H/o 0.10 NN17 NN17-18 0 43.9	NN17	NN17-03	0	42.6	1.5	0.50	AMK76	6222	15	93.7	н/о	0.10
NN17 NN17-08 0 30.9 1.5 0.28 AMK76 6222 29 120.5 H/0 0.18 NN17 NN17-09 0 70.7 H/0 1.78 AMK76 6222 50 51.8 H/0 0.07 NN17 NN17-10 0 307.2 H/0 7.33 AMK76 6222 83 45.4 H/0 0.18 NN17 NN17-11 0 483.2 H/0 18.11 - </td <td>NN17</td> <td>NN17-06</td> <td>0</td> <td>42.6</td> <td>1.7</td> <td>0.64</td> <td>AMK76</td> <td>6222</td> <td>22</td> <td>89.2</td> <td>н/о</td> <td>0.19</td>	NN17	NN17-06	0	42.6	1.7	0.64	AMK76	6222	22	89.2	н/о	0.19
NN17 NN17-09 0 70.7 H/o 1.78 AMK76 6222 50 51.8 H/o 0.07 NN17 NN17-10 0 307.2 H/o 7.33 AMK76 6222 83 45.4 H/o 0.18 NN17 NN17-10 0 483.2 H/o 18.11 - - - - - - 0.09 NN17 NN17-12 0 141.7 H/o 1.61 AMK76 6224 0 65.5 H/o 0.09 NN17 NN17-13 0 82.0 H/o 0.46 AMK76 6224 8 79.9 H/o 0.13 NN17 NN17-14 0 44.9 H/o 0.21 AMK76 6224 20 131.4 H/o 0.10 NN17 NN17-18 0 43.9 H/o 0.92 AMK76 6224 24 68.7 H/o 0.21 NN18 HH18-02 0	NN17	NN17-08	0	30.9	1.5	0.28	AMK76	6222	29	120.5	н/о	0.18
NN17 NN17-10 0 307.2 H/o 7.33 AMK76 6222 83 45.4 H/o 0.18 NN17 NN17-11 0 483.2 H/o 18.11 -	NN17	NN17-09	0	70.7	н/о	1.78	AMK76	6222	50	51.8	н/о	0.07
NN17 NN17-11 0 483.2 H/o 18.11 Image: Constraint of the state	NN17	NN17-10	0	307.2	н/о	7.33	AMK76	6222	83	45.4	н/о	0.18
NN17 NN17-12 0 141.7 H/o 1.61 AMK76 6224 0 65.5 H/o 0.09 NN17 NN17-13 0 82.0 H/o 0.46 AMK76 6224 8 79.9 H/o 0.13 NN17 NN17-14 0 44.9 H/o 0.21 AMK76 6224 20 131.4 H/o 0.10 NN17 NN17-18 0 43.9 H/o 0.92 AMK76 6224 24 68.7 H/o 0.21 NN17 NN17-18 0 43.9 H/o 0.92 AMK76 6224 24 68.7 H/o 0.21 NN18 HH18-02 0 75.0 H/o 0.19 AMK76 6224 50 20.9 H/o 0.13 NN18 HH18-02 0 75.0 H/o 0.19 AMK76 6224 50 20.9 H/o 0.13	NN17	NN17-11	0	483.2	н/о	18.11						
NN17 NN17-13 0 82.0 H/o 0.46 AMK76 6224 8 79.9 H/o 0.13 NN17 NN17-14 0 44.9 H/o 0.21 AMK76 6224 20 131.4 H/o 0.10 NN17 NN17-18 0 43.9 H/o 0.92 AMK76 6224 24 68.7 H/o 0.21 NN17 NN17-18 0 43.9 H/o 0.92 AMK76 6224 24 68.7 H/o 0.21 NN18 HH18-02 0 75.0 H/o 0.19 AMK76 6224 50 20.9 H/o 0.13 NN18 HH18-02 0 75.0 H/o 0.19 AMK76 6224 50 20.9 H/o 0.13	NN17	NN17-12	0	141.7	н/о	1.61	AMK76	6224	0	65.5	н/о	0.09
NN17 NN17-14 0 44.9 H/o 0.21 AMK76 6224 20 131.4 H/o 0.10 NN17 NN17-18 0 43.9 H/o 0.92 AMK76 6224 24 68.7 H/o 0.21 NN17 NN17-18 0 43.9 H/o 0.92 AMK76 6224 24 68.7 H/o 0.21 NN18 HH18-02 0 75.0 H/o 0.19 AMK76 6224 50 20.9 H/o 0.13 NN18 HH18-02 0 163.8 H/o 1.22 AMK76 6224 50 20.9 H/o 0.13	NN17	NN17-13	0	82.0	н/о	0.46	AMK76	6224	8	79.9	н/о	0.13
NN17 NN17-18 0 43.9 H/o 0.92 AMK76 6224 24 68.7 H/o 0.21 NN18 HH18-02 0 75.0 H/o 0.19 AMK76 6224 50 20.9 H/o 0.13 NN18 HH18-02 0 163.8 H/o 1.22 AMK76 6224 50 20.9 H/o 0.13	NN17	NN17-14	0	44.9	н/о	0.21	AMK76	6224	20	131.4	н/о	0.10
NN18 HH18-02 0 75.0 H/o 0.19 AMK76 6224 30 608.8 H/o 0.73 NN18 HH18-02 0 75.0 H/o 0.19 AMK76 6224 50 20.9 H/o 0.13 NN18 HH18-02 0 163.8 H/o 0.22 AMK76 6224 50 20.9 H/o 0.13	NN17	NN17-18	0	43.9	н/о	0.92	AMK76	6224	24	68.7	н/о	0.21
NN18 HH18-02 0 75.0 H/o 0.19 AMK76 6224 50 20.9 H/o 0.13 NN18 HH18-02 0 162.8 H/o 1.22 AMK76 6224 50 20.9 H/o 0.13							AMK76	6224	30	608.8	н/о	0.73
NN19 H119 02 0 162.9 $\pi/2$ 1.22 AMV76 6224 120 26.5 $\pi/2$ 0.22	NN18	HH18-02	0	75.0	н/о	0.19	AMK76	6224	50	20.9	н/о	0.13
$11110 \Pi\Pi10-03 0 103.0 H/0 1.22 AIVIN/0 0.224 1.39 30.3 H/0 0.23$	NN18	HH18-03	0	163.8	н/о	1.22	AMK76	6224	139	36.5	н/о	0.23
NN18 HH18-04 0 188.9 H/o 0.63	NN18	HH18-04	0	188.9	н/о	0.63						
NN18 HH18-05 0 212.2 н/о 0.43 AMK76 6234 0 129.6 н/о	NN18	HH18-05	0	212.2	н/о	0.43	AMK76	6234	0	129.6	н/о	
NN18 HH18-06 0 491.5 H/o 0.79 AMK76 6234 27 627.6 H/o	NN18	HH18-06	0	491.5	н/о	0.79	AMK76	6234	27	627.6	н/о	

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

260

СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В РАСТВОРЕННОЙ

Таблица 2. Продолжение

Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л	Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л
AMK76	6234	40	44.5	н/о		AMK76	6224_3	65	43.3	н/о	0.15
AMK76	6234	95	35.8	н/о		AMK76	6224_3	85	30.8	н/о	0.11
						AMK76	6224_3	105	25.8	н/о	0.15
AMK76	6235	0	106.7	н/о	0.48						
AMK76	6235	17	272.4	н/о	0.42	AMK81	6877	0	44.79	2.4	0.13
AMK76	6235	30	9.2	н/о	0.13	AMK81	6877	20	33.46	1.0	0.16
AMK76	6235	50	29.9	н/о	0.10	AMK81	6877	27	57.63	0.3	0.09
AMK76	6235	90	50.3	н/о	0.36	AMK81	6877	89	58.58	0.5	0.11
AMK76	6235	170	53.8	н/о	0.57						
						AMK81	6879	0	108.40	0.2	0.35
AMK76	6242	0	816.0	н/о	0.83	AMK81	6879	6	100.93	0.5	0.29
AMK76	6242	15	77.3	н/о	0.32	AMK81	6879	14	30.82	0.2	0.09
AMK76	6242	27	222.8	н/о	3.07	AMK81	6879	30	19.83	0.2	0.05
						AMK81	6879	75	9.82	0.2	0.17
AMK76	6255	0	358.0	н/о		AMK81	6879	166	23.45	0.1	0.32
	(2) (2) 2		450.0	,			6001		100.14		
AMK/6	6242_2	0	453.8	н/о		AMK81	6881	0	102.46	0.1	0.23
AMK76	6242_2	15	70.9	н/о		AMK81	6881	10	49.81	0.2	0.21
AMK/6	6242_2	27	259.0	Н/О		AMK81	6881	18	26.51	0.9	0.08
AMV76	(226.2	0	02.2		0.26	A MIZ 01	6002	0	101.20	0.2	0.26
AMK/0	6226_2	20	93.2 51.5	H/O	0.20		0883		101.39	0.3	0.26
AMK/0	6226_2	30	31.3 490.1	H/O	0.18		0883	50	25.40	0.3	0.20
AMK/6	6226_2	30	489.1	H/O	0.78		6883	50 100	35.46	0.5	0.15
AMK70	6226_2	00	12.0	H/O	0.07		0883	100	1.97	0.1	0.27
AMK70	6220_2	200	40.0 5 0	H/O	0.11	AIVINOI	0003	1/0	15.54	0.5	0.21
AWK/0	0220_2	290	5.0	н/О	0.32	A MK 81	6884	0	88.64	2.0	0.25
AMK76	6224 2	0	55.4	н/о	0.10	AMK81	6884	13	75 21	2.0	0.23
AMK76	622 + 2	28	55. 4 65.6	п/О	0.10	AMK81	6884	40	30.12	0.8	0.17
AMK76	6224_2	20 42	256.2	н/о	0.25	7 1111101	0004	10	50.12	0.0	0.14
AMK76	6224 2	100	15.2	н/о	0.15	AMK81	6886	8	87 29	04	0.14
AMK76	6227_2	0	63.4	п/о	0.15	$\Delta MK81$	6886	22	126.62	0.4	0.14
AMK76	6222_2	15	54.6	п/о	0.07	$\Delta MK81$	6886	40	42.23	0.0	0.05
AMK76	6222_2	27	60.9	н/о	0.12	7 1111101	0000	10	72.23	0.1	0.05
AMK76	6222_2	42	68.8	п/о	0.09	A MK 81	6887	0	50 50	11	0.09
AMK76	6222_2	50	30.0	п/о	0.07	$\Delta MK81$	6887	25	80.50	0.4	0.09
AMK76	6222_2	89	20.0 24 1	п/о	0.07	$\Delta MK81$	6887	50	52 51	0.7	0.09
2 1111X/U	0222_2		77,1	11/0	0.15	AMK81	6887	92	21 49	0.0	0.00
AMK76	6224 3	0	83.1	н/о	0.20	AMK81	6887	400	23.49	0.0	0.04
AMK76	6224 3	34	43.9	н/о	0.18	AMK81	6887	520	29.79	0.0	0.29
AMK76	6224 3	54	144.6	н/о	0.30				_,.,,	0.0	

Таблица 2. Продолжение

Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л	Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л
AMK81	6902	0	73.03	0.2	0.17	AMK81	6926	14	103.45	1.4	
AMK81	6902	10	61.53	0.2	0.07	AMK81	6926	25	90.01	0.2	
AMK81	6902	40	20.30	0.4	0.07	AMK81	6926	41	5.51	3.7	
AMK81	6902	200	9.88	0.1	0.08						
						AMK81	6927	0	78.51	0.1	0.19
AMK81	6903	0	70.02	0.7	0.42	AMK81	6927	25	83.16	0.0	0.26
AMK81	6903	12	52.54	0.6	0.27	AMK81	6927	50	22.40	0.1	0.07
AMK81	6903	30	34.18	1.5	0.47	AMK81	6927	363	8.01	0.1	0.38
AMK81	6903	150	6.13	0.1	0.08						
						AMK81	6928	2	82.11	0.1	0.20
AMK81	6911	0	59.69	0.0	1.27	AMK81	6928	23	52.16	0.1	0.15
AMK81	6911	18	9.43	1.5	0.30	AMK81	6928	34	33.35	0.1	0.08
AMK81	6911	50	7.52	1.4	0.19	AMK81	6928	200	2.49	0.1	0.18
AMK81	6911	150	38.66	0.3	0.22						
						AMK83	7015	2	251.4	н/о	0.30
AMK81	6912	0	107.07	1.9	0.24	AMK83	7015	12	319.2	н/о	0.69
AMK81	6912	25	61.37	0.8	0.11	AMK83	7015	25	54.1	н/о	0.12
AMK81	6912	40	63.41	0.5	0.08	AMK83	7015	42	16.6	н/о	0.35
AMK81	6912	301	19.31	0.0	0.17	AMK83	7015	100	28.0	н/о	0.24
						AMK83	7015	232	29.5	н/о	0.36
AMK81	6913	0	35.67	0.2	0.13						
AMK81	6913	10	86.53	0.1	0.14	AMK83	7016	2	183.6	н/о	0.37
AMK81	6913	35	76.79	0.3	0.15	AMK83	7016	12	99.5	н/о	0.56
AMK81	6913	360	13.19	0.9	0.23	AMK83	7016	20	393.9	н/о	0.66
						AMK83	7016	35	15.0	н/о	0.13
AMK81	6877_2	0	63.81	0.8	0.13	AMK83	7016	95	13.6	н/о	0.10
AMK81	6877_2	14	33.08	0.1	0.12	AMK83	7016	180	16.1	н/о	0.10
AMK81	6877_2	30	28.19	0.1	0.08	AMK83	7016	240	22.3	н/о	0.39
AMK81	6877_2	120	61.17	0.1	0.25						
						AMK83	7017	2	218.1	н/о	
AMK81	6916	0	75.32	0.0	0.24	AMK83	7017	10	236.9	н/о	
AMK81	6916	25	54.79	0.2	0.12	AMK83	7017	20	75.9	н/о	
AMK81	6916	60	18.64	0.1	0.08						
AMK81	6916	313	14.63	0.0	0.23	AMK83	7017	27	312.5	н/о	0.45
						AMK83	7017	40	164.0	н/о	
AMK81	6922	0	100.99	0.1	0.27	AMK83	7017	177	69.9	н/о	
AMK81	6922	20	55.40	0.1	0.14						
AMK81	6922	70	13.93	0.6	0.15	AMK83	7018	2	293.6	н/о	0.41
AMK81	6922	215	9.69	0.2	0.15	AMK83	7018	12	170.4	н/о	0.46
						AMK83	7018	19	210.7	н/о	
AMK81	6926	6	91.26	2.2	0.43	AMK83	7018	21	332.1	н/о	0.52

СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В РАСТВОРЕННОЙ

Таблица 2. Продолжение

Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л	Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л
AMK83	7018	22	121.4	н/о		AMK83	7026	146	52.5	н/о	0.21
AMK83	7018	30	49.7	н/о	0.15						
AMK83	7018	45	24.7	н/о	0.07	AMK83	7043	2	150.2	н/о	0.31
AMK83	7018	148	17.3	н/о	0.38	AMK83	7043	25	203.7	н/о	0.27
						AMK83	7043	50	289.3	н/о	0.42
AMK83	7019	2	303.9	н/о		AMK83	7043	75	63.7	н/о	0.16
AMK83	7019	10	327.5	н/о		AMK83	7043	129	80.5	н/о	0.36
AMK83	7019	20	79.2	н/о	0.39						
AMK83	7019	30	91.3	н/о	0.28	AMK89-2	7494	0	61.2	1.1	0.15
AMK83	7019	40	43.7	н/о		AMK89-2	7494	20	72.5	0.7	0.13
AMK83	7019	60	9.1	н/о		AMK89-2	7494	30	33.5	0.4	
AMK83	7019	140	11.0	н/о		AMK89-2	7494	210	14.6	1.5	0.08
AMK83	7019	267	74.7	н/о		AMK89-2	7494	1100	22.1	0.9	0.07
AMK83	7020	2	257.8	н/о	0.46	AMK89-2	7494	1550	24.6	2.0	0.14
AMK83	7020	14	365.6	н/о	0.38	AMK89-2	7494	1648	13.9	1.7	0.08
AMK83	7020	35	39.9	н/о	0.08						
AMK83	7020	145	19.3	н/о	0.30	AMK89-2	7495	0	89.9	0.7	0.10
						AMK89-2	7495	23	75.9	0.6	0.27
AMK83	7021	2	113.7	н/о	0.24	AMK89-2	7495	60	40.9	1.2	0.07
AMK83	7021	4	110.0	н/о	0.25	AMK89-2	7495	240	19.1	2.1	0.05
AMK83	7021	10	26.6	н/о	0.22	AMK89-2	7495	491	33.7	0.4	0.14
AMK83	7021	30	103.6	н/о	0.08	AMK89-2	7496	0	71.4	2.5	0.10
AMK83	7021	60	23.8	н/о	0.25	AMK89-2	7496	20	11.5	36.5	0.10
						AMK89-2	7496	60	49.3	1.6	0.23
AMK83	7023	2	298.3	н/о	0.50	AMK89-2	7496	173	24.3	1.1	0.07
AMK83	7023	10	274.4	н/о	0.57						
AMK83	7023	15	160.6	н/о	0.48	AMK89-2	7498	0	48.7	0.5	0.09
AMK83	7023	30	71.1	н/о	0.22	AMK89-2	7498	12	73.1	0.6	0.06
AMK83	7023	81	18.6	н/о	0.29	AMK89-2	7498	20	46.4	0.7	0.06
						AMK89-2	7498	50	68.6	0.7	0.10
AMK83	7025	2	143.5	н/о	0.24	AMK89-2	7498	193	21.4	0.5	0.11
AMK83	7025	10	28.1	н/о							
AMK83	7025	20	66.7	н/о	0.16	AMK89-2	7499	0	64.0	1.0	0.07
AMK83	7025	50	49.1	н/о		AMK89-2	7499	20	40.7	0.5	0.06
AMK83	7025	300	15.0	н/о	0.11	AMK89-2	7499	60	40.2	0.7	0.05
AMK83	7025	404	24.3	н/о		AMK89-2	7499	230	25.2	0.9	0.22
AMK83	7026	2	39.3	н/о	0.17	AMK89-2	7500	0	39.9	1.0	0.07
AMK83	7026	20		н/о	0.07	AMK89-2	7500	18	50.3	1.3	0.08
AMK83	7026	50	67.4	н/о	0.16	AMK89-2	7500	81	24.7	0.6	0.09
AMK83	7026	100	52.7	н/о	0.10						

Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л	Экспедиция	№ станции	Глубина, м	РОС, мкг/л	РІС, мкг/л	РМ, мг/л
AMK89-2	7501	0	74.5	1.6	0.12	AMK89-2	7503	50	26.7	0.3	0.08
AMK89-2	7501	26	36.9	0.8	0.05	AMK89-2	7503	102	30.2	0.3	0.25
AMK89-2	7501	120	125.8	0.9	0.12						
AMK89-2	7501	286	34.7	1.1	0.60	AMK89-2	7504	0	72.0	1.7	0.14
						AMK89-2	7504	14	81.6	3.5	0.12
AMK89-2	7502	0	78.5	0.5	0.14	AMK89-2	7504	30	31.7	0.9	0.11
AMK89-2	7502	17	27.5	2.5	0.11	AMK89-2	7504	117	25.1	0.6	0.20
AMK89-2	7502	40	27.8	0.4	0.07						
AMK89-2	7502	227	39.1	0.4	0.44	AMK89-2	7505	0	60.3	1.4	0.19
						AMK89-2	7505	8	60.8	0.9	0.10
AMK89-2	7503	0	66.7	0.6	0.12	AMK89-2	7505	30	28.5	0.3	0.10
AMK89-2	7503	17	46.7	0.8	0.10	AMK89-2	7505	69	50.6	0.3	0.25

Таблица 2. Окончание

Таблица 3. Межгодовые вариации времени схода льда и максимального паводка в Карском море

Гол	Поти отборо нроб	Пик пол	юводья*	Площадь открытой воды**				
ТОД	даты отоора проо	Обь	Енисей	20%	50%	90%		
2007	AMK-54 (9.09–29.09)	II.6	I.6	III.6	I.7	III.7		
2011	AMK-59 (15.09–29.09)	II.5***	II.5	III.5	I.6	I.7		
2014	ПШ-128 (11.08-07.09), ПШ-129 (20.09-2.10)	III.5	III.5	I.7	II.7	III.7		
2016	HH-16 (29.03–8.04), AMK-66 (16.07–16.08)	III.5	I.6	I.6	II.6	I.7		
2017	HH-17 (28.02–10.03)	I.6	I.6	I.6	III.6	I.8		
2018	HH-18 (29.06–15.07)	III.6	II.6	II.7	III.7	I.8		
2019	AMK-76 (7.07–1.08)	III.5	I.6	I.6	III.6	I.7		
2020	AMK-81 (1.09–20.09)	III.5	III.5	II.5	II.6	III.6		
2021	AMK-83 (22.06–30.06)	III.5	I.6	II.6	III.6	I.7		
2022	AMK-89-2 (29.09-3.10)	I.6	III.5	II.6	III.6	I.7		

Примечание: * – на водомерных постах в Салехарде и Игарке;** – в центральной части моря, южнее линии мыс Желания – п-в Таймыр, римскими цифрами отмечена декада месяца; *** – жирным шрифтом выделены самое раннее и самое позднее время максимального паводка и освобождения 50% поверхности моря ото льда.

Общий и растворенный органический углерод. Содержание растворенного органического вещества (DOC) в шельфовых морях Российской Арктики обычно превышает содержание взвешенного (POC) более чем в 10 раз [22] и оказывает основное влияние на формирование балансовых характеристик цикла углерода. В формирование поля концентраций растворенного органического вещества в Карском море основной вклад вносят два источника: поставка OB с речным стоком и его синтез в ходе вегетативных процессов. Поступление DOC с речным стоком оценивалось неоднократно и составляет порядка (7.5–8.0) × 10⁶ тС/год [17]. Балансовые оценки новосинтезированного автохтонного OB в акватории Карского моря на данный момент отсутствуют. До начала исследований по программе "Экосистемы морей Сибирской Арктики" было показано, что распределение DOC в зоне смешения вод река-море для Карского моря носит консервативный характер и определяется обратной линейной зависимостью концентраций DOC от величин солености [3]. Ранние мониторинговые работы (2007–2011 гг.) подтверждали указанную зависимость для данной зоны [1, 2], при этом соотношения DOC/соленость для поверхностных горизонтов станций удаленных от зоны выноса пресных вод хорошо ложились на линию тренда (рис. 3, VIII, XI), что позволяло предполагать, что именно смешение речных и морских вод определяет поле концентраций DOC в Карском море.

Анализ обобщенного массива накопленных данных по содержанию растворенного органического углерода показал более сложную картину его распределения в водах Карского моря. На рис. 2 представлены значения DOC на всех горизонтах станций как в зоне речного стока, так и в области моря, не подверженной его существенному влиянию. Из графика видно, что линейные тренды для всех исследованных проб прослеживаются нечетко из-за существенного разброса концентраций DOC в зоне высокой солености. При этом для весеннего периода (июнь-июль, рис. 2, красные круги) наблюдается относительное повышение концентрации растворенного органического углерода по сравнению с осенним (август-октябрь, рис. 2, зеленые ромбы) как в зоне вод низкой, так и высокой солености.

Повышение концентраций растворенного органического углерода в весенний и летний период показывает также анализ средних значений DOC по всем исследованным пробам для разных диапазонов солености, приведенных в табл. 4. Средние концентрации в июне—июле выше, чем в августе—октябре. Данное явление фиксируется в сильно распресненных поверхностных горизонтах, но необходимо отметить значительное увеличение содержания органического углерода в подстилающих водах, в которых не прослеживается краткосрочное взаимодействие с водами речного стока.

Обобщенный материал позволил провести анализ сезонной изменчивости концентраций DOC в различных районах моря. Достаточно подробно была исследована временная динамика для центрального района моря и Обского разреза. Для Енисейского разреза данных несколько меньше. Зависимости содержания DOC от солености представлены на рис. 3. Построение линейных трендов и расчет корреляционных зависимостей проводился для горизонтов верхнего перемешенного слоя разреза, выделенного по градиенту значений температуры и солености. Подстилающие горизонты станций разреза в расчете не исполь-



Рис. 2. Зависимость содержания растворенного органического углерода от солености в водах Карского моря в 2007–2022 гг. по всем исследованным пробам в зимний, весенний и осенний периоды.

	И	юнь—иі	оль				Авгу	ст-окт	ябрь		
				Верхн	ий перем	ешанный слой					
S, psu	0-5	5-10	10-20	20-30	30-35	S, psu	0-5	5-10	10-20	20-30	30-35
Среднее значение	10.5	10.2	8.6	3.7	1.8	Среднее значение	8.3	7.6	5.0	3.2	1.7
Минимальное	7.2	7.3	5.7	1.4	0.6	Минимальное	5.5	6.9	3.5	0.9	0.9
Максимальное	13.6	13.2	11.5	8.8	7.0	Максимальное	11.9	8.3	8.3	7.1	4.5
Кол-во измерений	22	12	8	8	69	Кол-во измерений	14	3	27	106	101
				Под	стилающ	ие горизонты					
S, psu	0-5	5-10	10-20	20-30	30-35	S, psu	0-5	5-10	10-20	20-30	30-35
Среднее значение	Нет	Нет	11.0	7.2	2.8	Среднее значение	Нет	Нет	3.9	3.9	2.0
Минимальное			8.6	1.4	0.5	Минимальное			3.9	2.2	0.5
Максимальное			13.3	10.6	10.6	Максимальное			3.9	7.8	7.6
Кол-во измерен	ий		2	13	117	Кол-во измерени	1Й		1	11	241

Таблица 4. Средние значения концентраций растворенного органического вещества (DOC, мг/л) в водах Карского моря в весенний и осенний периоды

зовались. Аналогичные расчеты были проведены и для отношения TOC/соленость. Начиная с 2016 г. количество данных по содержанию TOC в водах моря превышает количество данных по содержанию DOC из-за особенностей организации экспедиционных работ. Картина распределения OB, угол наклона тренда и коэффициенты корреляции практически идентичны для общего и органического углерода.

Отношения DOC/соленость для Обского разреза представлены на рис. 3 (V, VI, VII и VIII). В 2014, 2016 и 2019 гг. максимум стока Оби фиксировался в третьей декаде мая. в 2007 г. во второй. Самый поздний сход льда (2-я декада августа) был в 2014 г., ранний (2-я декада июня) в 2016 г.. В июле 2019 г. Обский разрез был выполнен непосредственно после схода льда (рис. 3, V). Для линейного тренда (Y = -0.25X + 9.6) показана очень высокая корреляционная зависимость $(R^2 = 0.99)$, хотя его расчет по четырем отношениям DOC/соленость может вызвать обоснованные вопросы. Однако тренд отношения ТОС/ соленость (Y = -0.24X + 9.4), для которого было использовано 40 парных значений, показывает практически столь же высокую корреляцию ($R^2 =$ 0.93). Средняя доля взвешенного органического углерода (РОС) в общем органическом углероде (ТОС) составляет для данного сезона 5.3% отн. (45 определений), что сопоставимо с погрешностью определения ТОС и DOC и позволяет с оговорками использовать данную линию тренда. При этом точки подстилающих поверхностный слой горизонтов находились практически на линии трендов. Для конца июля 2016 г. (рис. 3, VI) и августа 2014 г. (рис. 3, VII) зависимость DOC/ соленость выражена хуже ($R^2 = 0.81 \text{ и } 0.73 \text{ соответ-}$

ственно). Большие вариации концентраций DOC наблюдаются в областях как низкой, так и высокой солености. Повышение концентраций DOC в распресненных водах может быть обусловлено сезонным увеличением его содержания в водах речного стока, увеличение содержания ОВ в водах высокой солености таким образом объяснено быть не может. Также увеличение концентраций DOC наблюдается в подстилающих верхний перемешанный слой горизонтах. На взгляд авторов, единственным возможным источником углерода в данных областях может быть новообразованное автохтонное ОВ. Если принять данную гипотезу, то построение линии тренда с использованием горизонтов с пониженным содержанием углерода (рис. 3, VI, пунктирная линия) теоретически дает возможность оценить увеличение концентраций DOC, связанное со вкладом новосинтезированного ОВ. В сентябре 2007 г. (рис. 3, VIII) фиксировалась прямая связь концентраций DOC с соленостью (Y = -0.25X + 10.1, $R^2 = 0.94$). При этом на линию тренда, построенного по поверхностным горизонтам разреза, ложатся практически все исследованные в экспедиции пробы. Единственное исключение — ст. АМК4993, на которой наблюдаются повышенные значения DOC. Тут было отмечено самое высокое содержание биомассы фитопланктона для всего разреза [16]. Возможное увеличение концентраций DOC может быть связано с данным фактом.

Сезонная изменчивость концентраций растворенного органического углерода была прослежена и для речного стока Енисея (рис. 3, X, XI). Также как и для Оби в осенний период (сентябрь 2011г., рис. 3, XI) выявлена высокая корреляция значений солености и концентраций DOC.





Повышенные относительно теоретического тренда значения DOC (ст. AMK 5010, 5015) снова приурочены к максимумам биомассы фитопланктона [16]. Для весенне-летнего периода (август 2016 г., рис. 3, X) в водах Енисея показано увеличение концентраций DOC, выраженное еще более ярко, чем в водах Оби.

Для центральной части моря (рис. 3, I, II, III, IV) характерны относительно высокие значения солености. Некоторое распреснение вод отмечается только на поверхности северных станций разрезов. Построение корреляционных трендов поэтому для данного района некорректно, однако можно проследить сезонную динамику изменения концентраций. В июне 2021 г., при выполнении разреза вдоль ледовой кромки (III.6, табл. 3) было зафиксировано начало весеннего цветения фитопланктона [5], сопровождавшееся повышением концентраций взвешенного органического углерода. При этом концентрации растворенного OB оставались на низком уровне (рис. 3. I) как на поверхности, так и в толще вод. В данном сезоне в толще вод были зафиксированы минимальные концентрации DOC для Карского моря (менее 0.9 мг/л.). В июле 2019 г. работы проводились несколько позже освобождения исследуемой акватории от ледового покрова (III.6) и на ряде станций было выявлено развитое цветение фитопланктона в толще воды ниже верхнего перемешанного слоя [4]. При этом также зафиксировано существенное увеличение концентраций DOC в поверхностных и, особенно, в подстилающих горизонтах (рис. 3, II). Еще большее возрастание концентраций DOC во всей толще вод отмечено в июле 2016 г. (рис. 3, III) через месяц после схода льда (II.6), при этом цветение планктона наблюдалось фрагментарно на северных станциях разреза [15]. В сентябре 2020 г. повышенных значений концентраций DOC и TOC практически не наблюдалось и все измеренные значения за исключением двух горизонтов ложатся на линию теоретического тренда (рис. 3, III). Также на линию условного теоретического тренда хорошо ложатся значения осеннего разреза в Северо-Восточной части моря (рис. 3, XII).

Таким образом, по мнению авторов, в осенний период устойчивая корреляционная зависимость значений DOC от солености характерна для всех исследованных районов моря и определяется поставками аллохтонного органического вещества. В ранний весенний период, до начала активного продуцирования органического вещества, данные зависимости также выражены достаточно четко. Для весенне-летнего периода наблюдается ухудшение корреляции DOC/соленость, связанное с повышением концентраций DOC, источником которого может быть новосинтезированное автохтонное OB. Динамику изменения содержания растворенного органического углерода внутри одного сезона в толще вод удалось проследить в июле 2019 г. Исследования проводились на станциях, расположенных вблизи ледовой кромки (АМК 6222, 6224, 6226) Первые станции разреза были выполнены непосредственно после схода льда, повторные через 10–14 и 20–25 суток. На данных станциях впервые для Карского моря был выявлен активный процесс весеннего цветения фитопланктона, маркируемый содержанием хлорофилла с постепенным смещением максимума его концентраций в глубинные слои в столбе воды [4].

При первичном измерении концентраций органического углерода непосредственно после схода льда (0–5 суток) были зарегистрированы значения DOC совпадающие со средними многолетними для исследованного района (рис. 4, ромбы). Во время повторных исследований (через 10–14 суток после первых измерений) было обнаружено существенное обогащение всего водного столба растворенным органическим углеродом (рис. 4, окружности) и при исследовании через 20–25 суток практически полное возвращение к первоначальному содержанию OB в толще вод (рис. 4, треугольники).

Максимумы концентраций растворенного органического углерода на данных станциях или совпадали с максимумами содержания фитопланктона или располагались несколько выше. Зафиксированные концентрации существенно превышали как среднемноголетние значения, так и концентрации измеренные в данной экспедиции в столбе воды вне зоны цветения. При этом на ст. 6226, на горизонте активного цветения, зарегистрированы содержания растворенного органического углерода, не встречавшиеся ранее в открытых районах Карского моря ни на поверхности, ни в толще вод (DOC > 8 мг/л).

Содержание взвешенного органического углерода на данных станциях также существенно повышено и достигает 600 мкгС/л. Исследования отобранных проб под микроскопом показали, что основная масса взвеси сформирована живыми клетками фитопланктона. Количество детрита в исследованных пробах крайне мало. При этом концентрации растворенного OB существенно превышают концентрации взвешенного, что может указывать или на повышенное продуцирование фитопланктоном растворенного OB или на активный переход новосинтезированного взвешенного OB в растворенную форму.

Аналогичная динамика, хотя и менее полно была прослежена в июле 2016 г. на ст. АМК 5304, 5306. На первой из них было зафиксировано резкое снижение концентраций DOC, на второй увеличение.



Рис. 4. Временная динамика изменений концентраций органического углерода в столбе воды на ст. AMK6222 (а), AMK6224 (б), AMK6226 (в). Ромбы — 1-я повторность, окружности — 2-я повторность, треугольники — 3-я повторность.

Выявленные факты показывают крайне высокие скорости биогеохимических процессов, происходящих в толще вод в весенний период, и возможную недооценку вклада растворенного органического углерода при составлении балансовых оценок его цикла. Расположение пика цветения под слоем скачка солености способствует увеличению концентраций ОВ в глубоководных горизонтах и может облегчать его транспорт в придонные слои из-за отсутствия разности плотностей на слое скачка.

Взвешенный органический углерод. Исследования тенденций распределения взвешенного вещества (PM) не являются главной целью данной работы, однако сведения о его содержании критически важны для интерпретации закономерностей распределения взвешенного органического вещества и поэтому приводятся в табл. 2.

Содержание взвешенного органического углерода в водах Карского моря на порядок мень-

ше, чем растворенного (табл. 2). Это характерно как для вод находящихся под влиянием речного стока, так и для районов открытого моря. Повышенные содержания РОС фиксируются в поверхностных горизонтах, в толще вод концентрации его уменьшаются, в придонных горизонтах иногда снова возрастают. Зависимость концентраций РОС от глубины представлена на рис. 5а. В весенний период средние концентрации РОС в поверхностном фотосинтетическом слое (0–50 м) повышены относительно осенних значений, в зимний период — понижены. В глубоководных горизонтах данной зависимости не выявлено.

Повышенные концентрации взвешенного органического углерода наблюдаются в пресных водах речного стока (рис. 5в). После прохождения геохимического барьера его концентрации резко убывают в связи с осаждением взвеси. Однако в водах высокой солености снова фиксируется их рост, связанный с поставками новообразован-



Рис. 5. Зависимости содержания взвешенного органического углерода (а, в) и его доли в общей взвеси (б, г) от глубины (а, б) и солености (в, г) в водах Карского моря в 2007–2022 гг.

ного органического вещества. Особенно ярко данная тенденция выражена для весеннего периода. В зимний период концентрации РОС низки во всем диапазоне солености.

Источник поступления взвешенного органического вещества хорошо маркирует его доля в общем количестве взвеси (рис. 5г). В речных водах преобладает минеральная компонента. Содержание РОС там обычно не превышает 20%. На геохимическом барьере река-море минеральная взвесь осаждается несколько быстрее, поэтому доля ОВ во взвеси возрастает. В зонах четко выраженных вертикальных градиентов температуры и солености в поверхностном слое, маркирующих зоны смешения вод разного генезиса (фронтальные зоны) часто наблюдается повышение значений первичной продукции и увеличение биомассы фитопланктона [20]. В данных областях наблюдается не только повышение концентраций РОС, но и увеличение доли ОВ в составе взвеси. Для горизонтов высокой солености доля ОВ во взвеси различна и зависит в основном от горизонта отбора, уменьшаясь с глубиной.

Зависимости соотношения POC/PM от глубины представлены на рис. 56. Повышенное содержание органического вещества в составе взвеси наблюда-

ется преимущественно в поверхностных горизонтах. При этом повышенные отношения РОС/РМ фиксируются не только в фотосинтетическом слое (0–50 м), где отмечено увеличение концентраций РОС (рис. 5а), но и распространяются на более глубоководные горизонты, плавно снижаясь ко дну. Это маркирует транспорт новосинтезированного ОВ в толщу вод. Новосинтезированное ОВ крайне биогеохимически активно, в процессе седиментации подвергается активной деструкции и практически не захоранивается в донных осадках [8].

Зафиксировано существенное увеличение концентраций взвешенного органического углерода в период весеннего цветения. В открытой части моря характерные концентрации РОС в верхнем перемешанном слое в осенний период составляют менее 100 мкг/л, в подстилающих горизонтах — менее 50 мг/л. В период весеннего цветения концентрации РОС в поверхностном слое вод в июне 2021 г. увеличивались до 300 мкг/л, а в подстилающих горизонтах в июле 2019 могли превышать 500 мкг/л (ст. АМК 6226-2 36 м — 489 мкг/л; ст. AMK 6224 30 м — 608 мкг/л). При этом, если в составе взвеси в осенний период наблюдалось большое количество частиц детрита. то весной взвесь была представлена практически чистыми клетками фитопланктона (В. М. Сергеева, личное сообщение).

Взвешенный неорганический углерод (PIC) практически отсутствует в водах Карского моря. Он не поставляется с водами речного стока и практически не синтезируется фитопланктонным сообществом моря. Поэтому он может быть исключен из геохимических балансов. При этом его следовые количества фиксируются в отдельных горизонтах и могут маркировать изменение состояния планктонных сообществ (например, присутствие кокколитофорид).

выводы

Анализ обобщенной базы по содержанию органического углерода в воде и взвеси Карского моря позволил выявить существенные различия его распределения в осенний и весенний периоды. Для осеннего периода характерны пониженные концентрации растворенного и взвешенного вещества относительно весеннего в зонах как низкой, так и высокой солености. Выявлено, что обогащение толщи растворенным органическим веществом может быть связано с увеличениями концентраций фитопланктона и особенно ярко проявляется в водах высокой солености. Прослежена связь изменения концентраций взвешенного и растворенного органического углерода в весенний период с поставками новообразованного автохтонного органического вещества. Показана

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

высокая лабильность новосинтезированного OB, связанная со скоростями продукционных и деструкционных процессов в толще вод. На основании распределений концентраций взвешенного органического вещества и отношения взвешенный органический углерод/взвесь показано, что вниз по столбу воды снижается не только концентрация взвешенного органического углерода, но и уменьшается его доля в составе взвеси.

Авторы статьи выражают огромную благодарность академику М. В. Флинту за многолетние усилия по руководству программой "Экосистемы морей Сибирской Арктики" и постоянную помощь авторам в их исследованиях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках соглашения № 169-15-2023-002.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Беляев Н.А., Пересыпкин В.И., Поняев М.С. Органический углерод воды, взвеси и верхнего слоя донных осадков западной части Карского моря // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 748–757.
- 2. Беляев Н.А., Поняев М.С., Кирютин А.М. Органический углерод воды, взвеси и верхнего слоя донных осадков центральной части Карского моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 563–576.
- 3. *Гордеев В.В.* Геохимия системы река-море. М.: И.П. Матушкина И.И., 2012. 452 с.
- 4. Демидов А.Б. Гагарин В.И., Еремеева Е.В. и др. Вертикальная изменчивость первичной продукции и хлорофилла в Карском море в середине лета: вклад подповерхностных максимумов в интегральные величины // Океанология. 2021. Т. 61. № 5. С. 737-752.
- 5. Демидов А.Б., Сергеева В.М., Гагарин В.И. и др. Первичная продукция и хлорофилл размерных групп фитопланктона Карского моря в период схода сезонного льда // Океанология. 2022. Т. 62. № 3. С. 346–357.
- 6. Дриц А.В., Кравчишина М.Д., Пастернак А.Ф. и др. Роль зоопланктона в вертикальном потоке вещества в Карском море и море Лаптевых в осенний сезон // Океанология. 2017. Т. 57. № 6. С. 934–948.
- Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Суханова И.Н. и др. Генезис и пространственное распределение концентрации взвеси в Карском море в период наибольшего сокращения арктической ледовой шапки // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 687–708.

- 8. Леин А.Ю., Маккавеев П.Н., Саввичев А.С. и др. Процессы трансформации взвеси в осадок в Карском море // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 643-679.
- Мошаров С.А., Сажин А.Ф., Дружкова Е.И. и др. Структурные характеристики и продуктивность фитоцена юго-западной части Карского моря ранней весной // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 420–430.
- Обзорные ледовые карты Северного Ледовитого океана // База данных ААНИИ. 2023. http://old. aari.ru/odata/_d0015.php?mod=1
- 11. Пелевин В.В., Завьялов П.О., Беляев Н.А. и др. Пространственная изменчивость концентраций хлорофилла «а», растворенного органического вещества и взвеси, в поверхностном слое Карского моря в сентябре 2011 г. по лидарным данным // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 183–193.
- 12. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Углерод в мировом океане. М.: ГЕОС, 2021. 352 с.
- 13. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
- Сажин А.Ф., Мошаров С.А., Романова Н.Д. и др. Планктонное сообщество Карского моря ранней весной // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 246–248.
- Сергеева В.М., Суханова И.Н., Флинт М.В. и др. Фитопланктон желоба св. Анны: влияние абиотических факторов // Океанология. 2020. Т. 60. № 4. С. 528–544.
- 16. Суханова И.Н., Флинт М.В., Сергеева В.М. и др. Фитоценозы эстуариев Оби и Енисея и Обь-Енисейского взморья // Экосистема Карского моря новые данные экспедиционных исследований: Материалы научной конференции, Москва, 27– 29 мая 2015 г. / Ответственный редактор Флинт Михаил Владимирович. Москва: ООО "АПР", 2015. С. 105–111.
- 17. Федулов В.Ю., Беляев Н.А., Гордеев В.В. и др. Новая оценка поставки растворенного органического углерода с водами Оби и Енисея в бассейн Карского моря // Океанология. 2023. Т. 63, № 3. С. 375–381.

- Федулов В.Ю., Беляев Н.А., Колоколова А.Н. и др. Базовые геохимические параметры верхнего слоя вод юго-западной части Карского моря в зимний период // Океанологические исследования. 2018. Т. 46. № 1. С. 115–122.
- Экосистемы Карского моря и моря Лаптевых: Экспедиционные исследования 2016 и 2018 гг. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Москва : ИП Ерхова И.М., 2021. 368 с.
- Экосистема Карского моря новые данные экспедиционных исследований : Материалы научной конференции, Москва, 27–29 мая 2015 года / Под ред. М.В. Флинта. Москва: ООО "АПР", 2015. 320 с.
- Экосистемы морей Сибирской Арктики. Материалы экспедиционных исследований 2015 и 2017 гг. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Москва : ООО "Агентство Печати и Рекламы", 2018. 232 с.
- 22. *Amon R.M.W.* The role of dissolved organic matter for the organic carbon cycle in the Arctic Ocean // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.) The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 83–199.
- 23. *Amon R.M.W., Rinehart A.J., Duan S. et al.* Dissolved organic matter sources in large Arctic rivers // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. V. 94. P. 217–237.
- 24. Köhler H., Meon B., Gordeev V.V. et al. Dissolved organic matter (DOM) in the estuaries of Ob and Yenisei and the adjacent Kara Sea, Russia // In: Stein R. et al (Eds). Siberian river run-off in the Kara Sea. Elsevier Science, 2003. P. 281–308.
- 25. *McClelland J.W., Tank S.E., Spencer R.G.M. et al.* 2023. Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset. https://www.arcticrivers.org/data
- 26. *Mosharov S.A., Druzhkova E.I., Sazhin A.F. et al.* Structure and Productivity of the Phytoplankton Community in the Southwestern Kara Sea in Early Summer // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. V. 11. P. 832.

ORGANIC CARBON CONTENT IN DISSOLVED AND PARTICULATED FORMS IN THE KARA SEA WATER

N. A. Belyaev^{*a*, #}, V. Y. Fedulov^{*a*}, M. D. Kravchishina^{*a*}, and S. A. Shchuka^{*a*}

^aShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia [#]e-mail: ratnick@mail.ru

Data of suspended matter content, concentrations of dissolved and particulate organic carbon in the Kara Sea water for 2007-2022 are summarized. A difference in the distributions of dissolved (DOC) and particulate (POC) organic carbon in the water column during the autumn (September) and spring-summer (July-August) periods was revealed. A concentrations increase of dissolved organic carbon was recorded both on the surface and in the water column in the summer. Analysis of the dependences of DOC concentrations on salinity showed that the increase in these concentrations is not associated with an increase in DOC concentrations in river runoff waters. There was also a significant increase in DOC and POC concentrations in phytoplankton bloom zones throughout the water column. Thus, a connection has been identified between seasonal increases of organic matter concentrations in the open part of the sea and the processes of phytoplankton blooming.

Keywords: dissolved organic carbon, particulate organic carbon, suspended matter, Kara Sea, Arctic

——— ХИМИЯ МОРЯ ——

УДК 550.47:552.143

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

© 2024 г. Н. А. Шульга^{1, *}, Е. А. Стрельцова¹, Н. В. Вылегжанина², В. Ю. Федулов¹, А. В. Полякова², Е. А. Романкевич¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия ² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

> *e-mail: nash.ocean@gmail.com Дата поступления 25.02.21 г. После доработки 21.06.2022 г. Принята к публикации 18.07.23 г.

Исследованы источники поставки и трансформации органического вещества (OB) при переходе из растворенной формы во взвесь, наилок и в донные осадки на меридиональном разрезе от дельты р. Лены до континентального склона (в интервале глубин от 10 до 2390 м, 63-й рейс НИС "Академик Мстислав Келдыш", сентябрь 2015 г.). Результаты изучения молекулярных маркеров OB показали, что растворенное и взвешенное OB морского и терригенного генезиса биодеградирует в водной толще и практически не накапливается в донных осадках. OB вод речного стока Лены в летний период не способствует формированию OB донных осадков. На внешнем шельфе выявлена область влияния подледного цветения на процесс осадконакопления.

Ключевые слова: море Лаптевых, н-алканы, органическое вещество, донные отложения, геохимия, Арктика

DOI: 10.31857/S0030157424020045 EDN: RWETBM

ВВЕДЕНИЕ

Море Лаптевых является одним из хорошо изученных морей Российской Арктики. Внимание исследователей сфокусировано на вопросах поставки терригенного материала [18, 24, 28, 34, 36, 44, 45], потоках метана из воды в атмосферу [26, 40] и таянии наземной мерзлоты [39, 41, 46]. Отдельный интерес представляют исследования гидрологических фронтальных зон и ассоциированных с ними химических, геохимических и биологических процессов [6, 16, 17, 33, 43].

Бассейн моря находится под доминирующим влиянием стока р. Лены (583 км³/год, 70% пресноводного стока), который постоянно увеличивается в связи с климатическими изменениями [6, 19, 35, 40]. В течение года в море Лаптевых вместе с речным стоком поступает около 70 млн т растворенных и 20 млн т взвешенных веществ [33, 43]. В том числе поставка органического углерода (Соорг) в растворенной и взвешенной формах суммарно составляет ~7 млн т [12]. Органическое вещество (OB) в своем составе содержит предельные углеводороды (н-алканы), которые являются информативным индикатором седиментационных и диагенетических процессов и позволяют оценить его генезис [27]. Наиболее подробная органо-геохимическая характеристика осадков исследуемого района представлена в работах [3, 9–11, 34, 44, 45, 47]. При этом до настоящего времени остаются недостаточно исследованными: поведение OB в водной толще во взвешенной и растворенной формах и его связь со сменой гидрофизических условий и биологическими процессами.

Данная работа посвящена изучению геохимических маркеров (С_{орг}, *н*-алканов) на разрезе от выноса р. Лены до континентального склона с целью определения источников поставки и степени преобразованности ОВ в системе вода взвесь — наилок — осадок. Для выявления особенностей седиментации в районе исследования был выполнен анализ гранулометрического состава поверхностных донных осадков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили пробы воды, взвеси, наилка и донных осадков, отобранные в 63-м рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" на субмеридиональном разрезе (сентябрь 2015 г.) в восточной части моря Лаптевых (рис. 1, табл. 1). Разрез (глубины 10 – 2390 м) протягивается от внешней области губы Буор-Хая до верхней части континентального склона к котловине Амудсена и хребту Гаккеля. 274 ШУЛЬГА и др. °с.ш. 80 Глубина, м 79 -20 522 78 5228 -2005224 77 MOPERAITTEBUIX 5223 -800 76 п-ов Таймыр 75 -1400Xamanzarun • 5215-2 74 -2000 Оленекский зал. 5220 73--2600 -a5216 72-P.Jena -3200 71-70 -3800 110 115 100 105 120 125 135 140 130 °в.д.

Рис. 1. Расположение станций пробоотбора в 63-м рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" в море Лаптевых (сентябрь, 2015 г.).

Расположение станций определялось исходя из анализа смены гидрологических и гидрохимических условий при движении от дельты р. Лены к континентальному склону [4].

Воду отбирали батометрами Нискина. Для разделения растворенного (РОВ) и взвешенного органического вещества (ВОВ) воду фильтровали через стекловолокнистые фильтры GF/F (размер пор 0.6–0.7 мкм) до насыщения фильтра. Фильтр

высушивали в сушильном шкафу при температуре 60°С до постоянного веса. Экстракцию алифатических углеводородов проводили из фильтрата хлористым метиленом в соотношении 3 : 1 (фильтрат : CH₂Cl₂). Предварительно фильтрат подкисляли соляной кислотой до pH~2. Экстракт хранили в стеклянных колбах при +4°С до проведения химического анализа. Отбор поверхностных проб донных осадков, в том числе наилка (0–0.5 см),

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ТРАНСФОРМАЦИИ

Область	Станция	Коорд с.ш.	инаты В.д.	Глубина, м	Соленость	T,° C	Chl-a, мг/м ²	ПП, мгС/м ³ /день
П П	5216	71°59.8′	130°06.3′	10	2.72	8.36	6.61	26.0
дельта р. лены	5218	72°41.0′	130°30.0′	18	5.75	8.34	4.98	24.7
	5220	73°20.0′	130°29.5′	25	17.7	5.07	8.95	15.9
	5215-2	74°15.0′	130°29.9′	26	21.1	3.52	6.42	10.8
Шельф	5223	76°28.2′	130°30.0′	58	20.6	3.68	3.86	15.3
	5224	77°06.1′	130°29.3′	59	22.0	3.57	1.77	7.49
	5228	77°38.3′	130°29.9′	91	27.0	2.96	7.73	7.29
Континенталь- ный склон	5225	78°22.0′	130°30.0′	2390	30.2	2.00	9.54	6.06

Таблица 1. Характеристики района исследований в сентябре 2015 г. (на основе данных [4, 15])

Примечание. Значения солености, температуры, хлорофилла "а" (Chl-а) и первичной продукции (ПП) приведены для поверхностного слоя воды.

осуществлялся трубкой Ниемисто. После пробоотбора образцы хранились при –18°С до камеральных исследований.

Определение растворенного (РОУ) и взвешенного (ВОУ) органического углерода, содержания органического углерода в осадках (C_{opr}) и карбонатного углерода ($C_{кар6}$) выполняли на анализаторе TOC-Vcph фирмы Shimadzu с приставкой SSM-5000A. Для РОУ диапазон измеряемых концентраций составляет 0.1–250 мгС/л (объем вводимой пробы 50 мкл), для ВОУ 5–10000 мкгС/л. Для донных осадков диапазон измеряемых концентраций углерода 0.05–30% (на сухой вес осадка), навеска 100 мкг. Погрешность прибора 1%. Воспроизводимость результатов анализов 5%. Перед началом серии анализов проводилась калибровка прибора по стандартным образцам донных осадков (СДО2, СДО1, СДО3).

Экстракция общей липидной фракции ОВ (TLE) из образцов взвеси, наилка и донных осадков проводилась смесью хлористый метиленметанол (9:1) с помощью ультразвука. Навеска лиофилизированных образцов осадков составляла ~10 г, наилка ~3 г, взвеси ~ ½ фильтра. Массу общей липидной фракции определяли гравиметрически после упаривания экстракта в токе азота. Предварительно экстракт очищали от серы с помощью активированной меди. Неполярную фракцию углеводородов выделяли методом колоночной хроматографии на силикагеле, в качестве элюента использовали гексан. Газохроматографический-масс-спектрометрический (ГХ-МС) анализ н-алканов и изопреноидов (пристан, фитан) выполняли на приборе Shimadzu QP-5050A (Япония). Условия ГХ разделения: кварцевая колонка с привитой жидкой фазой SE-30, температура инжектора 300°С, температура источника ионов 300°С. Режим программирования температуры: начальная температура колонки 60°С с выдерж-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

кой 3 мин. нагрев до 300°С со скоростью 4°С/мин. Объем вводимой пробы — 2 мкл. Режим ввода пробы splitless. В качестве газа-носителя использовался гелий. Расход газа через колонку 1.2 мл/мин. Анализ проводился в режиме электронной ионизации (EI 70eV), сканирование масс-спектра от 40 до 800 аем. Идентификацию веществ проводили по временам удерживания и масс-спектрам исследуемых соединений стандартных образцов $(n-C_8-C_{40}, Pr, Phy)$, а также библиотеке NIST. Для расчета концентраций использовался внутренний стандарт — SQV сквалан (2,6,10,15,19,23-гексаметилтетракозан). Содержание н-алканов в воде и взвеси приводится из расчета на объем профильтрованной воды (мкг/л). Содержание н-алканов в осадках и наилке приводится из расчета на сухую навеску образца (мкг/г осадка). Для нивелирования влияния гранулометрического состава осадков расчет проводился также и на массу углерода (мкгС/г).

Исследование гранулометрического состава проводили на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц SHIMADZU SALD 2300. Подготовка валовых проб для гранулометрического анализа (навеска 1-2 г) включала выдерживание пробы в течение суток в дистиллированной воде (20 мл) с добавлением 20 мл раствора гексаметафосфата натрия (0.7% Na₆P₆O₁₈). Непосредственно перед анализом стакан с пробой помещали в ультразвуковую ванну на 5 минут для диспергирования частиц. В анализаторе проба подвергалась воздействию ультразвука в течение 1 минуты. Средний размер частиц осадка рассчитывался по методике [31].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Растворенное органическое вещество. Содержание РОУ в поверхностном слое воды на разрезе уменьшается от 5.96 до 2.32 мг/л с увеличением солености при движении от дельты Лены к континентальному склону (табл. 1, 2). Концентрации растворенных липидов также уменьшаются с 3.43 до 2.58 мг/л, тогда как суммарные концентрации *н*-алканов возрастают к мористой части разреза с 0.003 до 0.008 мг/л (табл. 2).

Анализ липидной фракции OB показал наличие *н*-алканов в интервале $C_{12}-C_{35}$ с мономодальным распределением. В составе *н*-алканов доминируют низкомолекулярные гомологи морского генезиса (рис. 2а, б, в, табл. 2). Их концентрации увеличиваются от дельты ($\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 1.51$) к континентальному склону ($\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 5.17$). В мористой части разреза в составе алканов происходит смена доминирующего гомолога с *н*- C_{18} на *н*- C_{16} . Содержания *н*-алканов терригенного генезиса $C_{27+29+31}$ на разрезе близки и составляют 0.41 мкг/л в среднем. При этом их доля в общем составе н-алканов последовательно убывает от дельты к склону и принимает значения 12, 8 и 5% соответственно.

Органическое вещество взвеси. Содержание ВОУ в поверхностном слое вод снижается от 509 мкг/л в заливе Буор-Хая до 73 мкг/л в мористой части разреза (табл. 2, рис. 36). В глубинных слоях вод континентального склона на ст. 5225 содержание ВОУ значительно падает (12–28 мкг/л), при этом отмечен локальный максимум концентраций на горизонте 140 м (115 мкг/л). Концентрация липидов взвеси уменьшается по направлению от дельты (3.00 мг/л) к континентальному склону (0.27 мг/л). В толще воды (ст. 5225) содержание липидов изменяется незначительно (от 0.27 до 0.51 мг/л) на глубинах 0–600 м, падая практически до нуля в придонных горизонтах (табл. 2).

Содержание н-алканов во взвеси в поверхностном слое воды в заливе Буор-Хая и на шельфе было сходным (0.20 мкг/л). На северной оконечности разреза (ст. 5225) концентрация н-алканов в составе ВОВ резко снижается до 0.055 мкг/л (табл. 2). В образцах взвеси установлено наличие н-алканов С12-С35, их распределение различается в зависимости от удалённости от берега станции отбора (рис. 2г, д, е). В дельте (ст. 5218) максимумы концентраций н-алканов приходятся на средне- и высокомолекулярную области (рис. 2г). Здесь выявлено максимальное на всем разрезе содержание соединений терригенного генезиса (С₂₇₊₂₉₊₃₁ = 39.8 нг/л). В мористой части разреза (ст. 5215-2) и на континентальном склоне (ст. 5225) максимумы концентраций н-алканов приходятся на низко- и среднемолекулярную области: $\Sigma C_{12-24} / \Sigma C_{25-35} = 4.00$ и 3.01 соответственно (табл. 2, рис. 2д, е). При этом на ст. 5215-2 выявлено максимальное для изученного разреза содержание гидробионтных соединений ($C_{15+17+19}$ = 32.1 нг/л). На основании рассчитанных индексов нечетности во взвеси обнаружено доминирование четных гомологов в низкомолекулярной области ($OEP_{17-19} = 0.62$, в среднем). Для высокомолекулярных н-алканов индекс нечетности CPI близок к 1 (CPI = 1.37, в среднем).

В толще воды на континентальном склоне (ст. 5225) с глубиной происходит постепенная смена основного источника поставки ВОВ с автохтонного на аллохтонный, значение индекса $C_{15+17+19}/C_{27+29+31}$ снижается от 1.54 до 0.91 (табл. 2).

Органическое вещество донных отложений. На изученном разрезе процентное содержание C_{opr} в поверхностном слое осадков колеблется от 0.38% (мелкозернистые пески) до 4.40% (алеврит). Наиболее высокие концентрации C_{opr} характерны для осадков зоны стока вод р. Лены (табл. 3, рис. 36, 4а).

Концентрации липидов в донных осадках снижаются при движении от дельты (475 мкг/г) в сторону континентального склона (88.8 мкг/г). достигая максимальных значений в наилке в зоне выноса р. Лены (616 мкг/г, табл. 3). Концентрации н-алканов, рассчитанные на сухую массу и на углерод, так же убывают по направлению к склону от дельты. Хроматографический анализ экстрактов показал наличие н-алканов в диапазоне С₁₂-С₃₅ с различным групповым соотношением гомологов (рис. 2ж, з, и). Распределение н-алканов носит мономодальный характер (кроме ст. 5224), явно выражены пики C₂₇, C₂₉, C₃₁, C₃₃. На основании рассчитанных индексов нечетности ОЕР₁₇₋₁₉ и СРІ обнаружено доминирование четных гомологов в низкомолекулярной области и нечетных в высокомолекулярной (0.60 и 6.21 в среднем соответственно). Исключение составляет ст. 5225, где в распределении н-алканов в низкомолекулярной области доминируют нечетные гомологи и $OEP_{17-19} = 1.24$.

Гранулометрический состав поверхностных осадков и наилка, представленный в таблице 4, значительно меняется по разрезу (рис. 3в, 4б).

В составе осадков ст. 5218 и ст. 5220 преобладает плохо сортированный алеврит (коэффициент сортировки 3.7–4.0) с примесью пелита и песка (рис. 3в, 4а). Распределения размеров частиц демонстрируют бимодальный характер (моды 8.55 и 20.3 мкм; 8.55 и 230 мкм, соответственно) при среднем размере частиц 10.6 и 9.08 мкм (рис. 3д). На ст. 5215-2 осадки представлены хорошо сортированным песком (коэф. сортировки 1.28, мономодальное распределение) со средним размером частиц 155 мкм. При движении на север пески сменяются

Таблица 2. Содержание растворенного и взвешенного ОВ в пробах воды и взвеси, отобранных на меридиональном разрезе моря Лаптевых в сентябре 2015 г. Органо-геохимические индексы ОВ рассчитаны на основе содержания н-алканов.

	CPI	1.22	1.18	06.0		CPI	1.52	Ι	0.67	1.29	Ι	1.64	1.29	1.82	I	I	
	OEPC ₁₇₋₁₉	0.24	0.34	0.19		OEPC ₁₇₋₁₉	0.87	I	0.52	0.56	I	0.45	0.60	0.72	I	I	
	TAR	1.32	0.43	0.41		TAR	2.76	I	0.41	0.39	I	0.65	0.91	1.10	I	I	
	$\sum_{\Sigma C_{25-35}} C_{25-35}$	1.51	2.94	5.17		$\sum_{\Sigma C_{25-35}} C_{25-35}$	0.92	I	4.00	3.25	I	3.01	1.77	1.89	I	I	
	$C_{27+29+31}$	0.76	2.33	2.45		$C_{27+29+31}$	0.36	I	1.83	2.56	Ι	1.54	1.10	0.91	Ι	I	•
rB0	$C_{16+18}+C_{20-24},$	53.0	42.8	68.9	80	$C_{16+18}+C_{20-24}, \\ \%$	48.3	Ι	55.6	74.4	Ι	62.9	73.2	78.3	Ι	I	
кое вещесл	$C_{27+29+31},$	12.1	8.1	5.5	ое вещесті	$C_{27+29+31}, \\ \%$	19.8	I	8.85	3.68	Ι	8.80	4.07	2.74	Ι	I	
рганичесн	$C_{15+17+19}, \\ \%$	9.2	18.8	13.6	рганическо	$C_{15+17+19}, \\ \%$	7.17	Ι	16.2	9.44	Ι	13.5	4.50	2.49	I	Ι	
воренное с	С ₂₇₊₂₉₊₃₁ , МКГ/Л	0.31	0.49	0.43	ешенное ој	$C_{27+29+31}, H\Gamma/JI$	39.8	I	17.5	6.65	Ι	4.85	5.05	10.7	Ι	I	TOTIO (()
Pacı	$C_{15+17+19}, MK\Gamma/JI$	0.24	1.15	1.07	B _{3B}	С ₁₅₊₁₇₊₁₉ , НГ/Л	14.4	I	32.1	17.0	I	7.45	5.57	9.68	I	I	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	<i>н</i> -ал- Каны, МКГ/л	2.58	6.10	7.86		<i>н</i> -ал- Каны, МКГ/л	0.20	I	0.20	0.18	I	0.055	0.12	0.39	I	ĺ	LT E total li
	TLE*, MI/JI	3.43	2.78	2.58		TLE, мг/л	3.00	I	0.77	0.67	I	0.27	0.51	0.32	0.003	0.02	
	POY, MrC/JI	5.96	3.61	2.32		BOY, мкгС/л	509	205	254	173	80.1	72.9	115	28.1	12.3	12.6	ži munuri i
	Гори- зонт, м	0	0	0		Гори- зонт, м	0	0	0	10	0	0	140	600	2100	2535	jannigo *
	№ стан- ции	5216	5215-2	5225		№ стан- ции	5218	5220	5215-2		5228	5225					Птимини

2 5,

С₁₅₊₁₇₊₁₉ – маркер морского OB, С₂₇₊₂₉₊₃₁ – маркер терригенного OB, С₁₆₊₁₈+С₂₀₋₂₄ – маркер бактериально-преобразованного OB (напр. [27]). $OEPC_{17-19} = 0.5 \times (OEPC_{17} + OEPC_{19}), OEPC_{17} = (C_{15} + 4 \times C_{17} + C_{19})/(4 \times C_{16} + 4 \times C_{18}), OEPC_{19} = (C_{17} + 4 \times C_{19} + C_{11})/(4 \times C_{18} + 4 \times C_{20}).$ $CPI = 0.5 \times [(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32}) + (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})] [37].$ $TAR = (C_{27} + C_{29} + C_{31}) / (C_{15} + C_{17} + C_{19}).$

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ТРАНСФОРМАЦИИ

2024

иверхностных цества, в мклС	
ыерхно цества,	
см) и п ухого ве	
а (0–0.5 мкг/г с	
х наилк одятся в	
в проба ии приве	
алканов центраці	
ания <i>н-</i> а г. Конг	
: содерж 6pe 2015	
а основе св сентя	
UHHDIC H AIITEBEIN DB.	
рассчита в моря Л ч-алкане	
cbi OB, 1 1 paspese 1 cymmy i	
е индеко нальном и в % на	
иически теридио углерод	
о-геохил ных на м ческий	
. Органо отобрани а органи	
аблица 3 садков, с есчете на	

278

№ станции	52	218	52	20	5215-2	5223	52	24	5228	5225
Тип объекта	наилок	донный осадок	наилок	донный осадок	донный осадок	донный осадок	наилок	донный осадок	донный осадок	донный осадок
Горизонт, см	0-0.5	0.5–2	0-0.5	0.5-2	0 - 3	0-1	0-0.5	0.5-1	0-2	0-2
$C_{opr}, \%$	3.49	4.40	2.83	2.65	0.38	1.63	0.89	0.84	1.14	1.40
TLE, MKI/F	616	475	439	300	69.3	I	603	248	I	88.8
н-алканы, мкг/г	16.7	10.5	7.31	5.05	0.69	I	1.00	4.86	I	1.51
$C_{15+17+19}$, MKT/F	0.95	0.73	0.45	0.39	0.03	I	0.14	0.44	I	0.07
$C_{27+29+31}, MK\Gamma/\Gamma$	7.51	3.68	2.96	1.75	0.31	I	0.28	0.24	I	0.71
$C_{16+18}+C_{20-24}, MK\Gamma/\Gamma$	5.27	3.33	2.57	1.75	0.19	I	0.46	3.92	I	0.36
$C_{15+17+19}, \%$	5.69	6.95	6.20	7.75	4.89	I	14.2	8.97	I	4.50
$C_{27+29+31}, \%$	44.8	35.2	40.5	34.6	44.7	I	27.7	4.89	I	46.9
$C_{16+18}+C_{20-24}, \%$	31.4	31.9	35.2	34.7	28.1	I	46.1	80.7	I	24.0
$C_{15+17+19}/C_{27+29+31}$	0.13	0.20	0.15	0.72	0.11	I	0.52	1.84	I	0.10
$\Sigma C_{12-24} / \Sigma C_{25-35}$	09.0	0.52	0.51	0.56	0.33	I	1.38	7.19	I	0.24
TAR	7.88	5.07	6.53	4.46	9.14	I	1.94	0.54	Ι	10.4
OEPC ₁₇₋₁₉	0.57	0.73	0.50	0.61	0.56	I	0.50	0.72	I	1.24
CPI	9.24	5.18	7.40	4.88	6.59	I	7.06	3.62	I	5.71
Pr/Phy*	1.23	1.13	1.23	1.10	2.06	Ι	0.84	0.86	I	1.84
н-алк., мкгС/г	480	237	259	190	183	I	113	581	Ι	108
$C_{15+17+19}, MK\Gamma C/\Gamma$	27.3	16.5	16.0	14.8	8.94	Ι	16.1	52.1	I	4.85
C ₂₇₊₂₉₊₃₁ , MKrC/r	215	83.6	105	65.9	81.7	I	31.2	28.4	I	50.5
Примечание:* – отношен	ние изопренои	идов пристана (Pr) к фитану (1	Phy); "—" – ai	нализ не провс	дился.				

Расчетные формулы для органо-геохимических индексов приведены в примечании к табл. 2.



Рис. 2. Типичные распределения *н*-алканов в образцах воды (а, б, в), взвеси (г, д, е) и донных осадков (ж, з, и) на меридиональном разрезе в море Лаптевых в сентябре 2015 г. в % на сумму *н*-алканов.

пелитово-алевритовыми илами с содержанием фракции <63 мкм, превышающим 80%, согласно [28] (рис. 3в, 4б). Вблизи бровки шельфа (ст. 5223) осадки сложены плохо сортированным песчанистым алевритом (коэф. сортировки 5.35) с примесью пелита (табл. 4, рис. 3в, 4б). Распределение размеров частиц приобретает полимодальный характер со средним значением 14.1 мкм (рис. 3 г, д). В составе поверхностных осадков на внешнем крае шельфа (ст. 5224, 5228) вновь отмечается преобладание хорошо сортированного песка со средним размером 189 и 122 мкм, соответственно. Это, вероятно, связано с вымыванием (неотложением) пелита и мелкого алеврита под действием активных гидродинамических процессов. На континентальном склоне (ст. 5225) (в соответствии с принципом циркумконтинентальной зональности) с увеличением глубины и расстояния от берега осадки становятся более тонкозернистыми, содержание песка снижается до 0%, средний размер зерен уменьшается до 5.17 мкм при коэффициенте сортировки 2.96 (табл. 4, рис. 3в-д,

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

46). Распределение размеров частиц становится бимодальным (4.34 и 24.2 мкм).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Принято считать, что растворенное и взвешенное OB, поступающее в моря с речным стоком, существенно влияет на распределение и состав OB в морских донных осадках [12, 27]. Зона смешения речных и морских вод играет важную роль в осаждении различных форм OB, сорбции микроэлементов, дальности их распространения в акватории [8, 12].

Одним из показателей специфических различий компонентов исходного OB может служить распределение относительного содержания н-алканов в углеводородной фракции OB. OB морского типа обычно имеет максимумы распределения нечетных *н*-алканов в диапазоне $C_{15}-C_{19}$, а генетически связанное с высшей наземной растительностью — в диапазоне $C_{25}-C_{35}$. Бактериально-преобразованная составляющая

№ станции	Тип образца	Интервал, см	Пелит (< 2 мкм), %	Алеврит (2—63 мкм), %	Песок (> 63 мкм), %
5218	Наилок	0-0.5	14.2	81.2	4.61
5218	Донный осадок	0.5-2	12.5	80.7	6.78
5220	Наилок	0-0.5	17.2	82.6	0.16
5220	Донный осадок	0.5-2	12.5	76.1	11.4
5215-2	Донный осадок	0-3	0	0	100
5223	Донный осадок	0-1	11.7	61.8	26.5
5224	Наилок	0-0.5	0	6.76	93.2
5224	Донный осадок	0.5-1	0	0.05	99.9
5228	Донный осадок	0-2	0	5.28	94.5
5225	Донный осадок	0-2	22.3	77.7	0

T 🖉 🖌 I					~		Π
	nauviomer	пицескии состав	TOUTLY OCALAD	и цаицка в из	WIEUULIV OD	nazilay Mui	AT TABLES IN THE PLINE
таолица т. і		philocknin cociab	доппил осадков	n namina d no	V ICITIDIA OU	разцал мог	
		1			~		

н-алканов приходится на C_{16} , C_{18} , $C_{20}-C_{24}$ [напр., 12, 27]. Поэтому отношение короткоцепочечных алканов к длинноцепочечным гомологам ($\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35}$, $C_{15+17+19}/C_{27+29+31}$, TAR) отражает вклад OB различного генезиса. В геохимическом плане особый интерес представляют индексы нечетности CPI, OEP₁₇, OEP₁₉, указывающие на степень диагенетических преобразований OB [27, 37]. Для определения окислительно-восстановительной обстановки осадконакопления используется отношение изопреноидов пристана (Pr) к фитану (Phy) [37].

Органо-геохимические маркеры РОВ и ВОВ. В направлении от дельты р. Лены к континентальному склону зафиксировано уменьшение концентраций РОУ и фракции липидов в нем при возрастании доли *н*-алканов в составе OB. Молекулярный и групповой состав н-алканов показывает, что в дельте РОВ сформировано смешанным автохтонно-аллохтонным органическим материалом, образованным морской биотой и остатками высших растений. На шельфе и континентальном склоне РОВ представлено преимущественно автохтонным веществом (рис. 2). Это маркирует процессы обогашения растворенного ОВ соединениями морского генезиса, тесно связанными с динамическим изменением состава планктонных сообществ во фронтальных зонах [15]. На шельфе и континентальном склоне концентрации н-алканов морского и терригенного генезиса остаются практически постоянными, что может быть связано с предельной растворимостью исследуемых соединений в данном типе вод. Значения индексов нечетности низко- и высокомолекулярных гомологов н-алканов (ОЕР₁₇₋₁₉ < 1, CPI < 1, табл. 2) в поверхностном слое воды, а также последовательное возрастание концентраций компонент бактериальной деструкции при движении в область континентального склона, указывают на достаточно высокую активность микроорганизмов в условиях низких температур в море Лаптевых.

Характер распределения ВОУ моря Лаптевых согласуется с другими морями Арктического бассейна, где концентрации ВОУ также уменьшаются при движении от области речных выносов к мористой части и от поверхности ко дну [1, 9, 13, 34, 38, 43]. Обращает на себя внимание ст. 5215-2, где выявлен целый ряд физико-химических, гидрологических и биологических особенностей в период проведения работ. По результатам исследований Сухановой с соавт. [15] на ст. 5215-2 выявлены самые высокие для шельфа численность (2011×10⁶ кл/м²) и биомасса фитопланктона (97 мг/м³). Среди водорослей доминирует морской диатомовый комплекс. Содержания хлорофилла "а", ВОУ и РОУ в поверхностном слое воды максимальные для шельфа (табл. 1, 2). Наблюдаются уменьшение глубины пикногалоклина и обогащение эвфотической зоны биогенными элементами [14]. Поверхностная температура на 1-1.5°С ниже, а соленость на 4-6 psu выше, чем на соседних станциях. Здесь изучался вертикальный поток вещества с помощью седиментационных ловушек [5]. На основании измеренных величин валового потока вещества $(19600 \text{ мг/м}^2/\text{сут})$, в работе [5] предполагается, что в данной области наблюдается лавинное осаждение взвеси из-за резкого изменения солености [14, 15, 36].

Согласно результатам изучения молекулярного состава и распределения *н*-алканов, по направлению от залива Буор-Хая к континентальному склону в составе ВОВ, также как и в РОВ, снижается доля терригенного ОВ и доминируют планктоногенная и бактериально-преобра-



Рис. 3. Распределение различных показателей на профиле р. Лена — континентальный склон в 2015 г. Батиметрический профиль от области выноса р. Лены до континентального склона моря Лаптевых с указанием станций пробоотбора (а). Распределение концентраций BOV в поверхностном слое воды (серая заливка) и содержание С_{орг} в поверхностных осадках в расчёте на их сухую массу (пунктир) (б). Гранулометрический состав поверхностных донных осадков (0–2 см) и коэффициент сортировки частиц (в). Кривые распределения размеров частиц поверхностных донных осадков (г). Изменение среднего размера частиц поверхностных осадков по разрезу (рассчитано по [31]) (д). Вертикальной пунктирной линией показано расположение станций отбора проб.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

зованная компоненты. Изменение состава ОВ $(\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 0.92$ в заливе, 4.00 на шельфе и 3.01 на континентальном склоне) согласуется с варианиями распреления первичной пролукции, концентраций хлорофилла "а" (табл. 1) и состава фитопланктонных сообществ [15]. Преобладание маркеров биогенного вещества во взвеси на примыкающем к заливу шельфе также было зафиксировано и описано в работе [34]. Это может быть связано с поставкой новообразованного ОВ из локализованного в этой области биологического фронта. Терригенная составляющая ОВ взвеси представлена соединениями с высокой степенью бактериальной трансформации (CPI = 1.37, в среднем). По изменению состава н-алканов и органо-геохимических индексов четко прослеживается изменение состава ВОВ в результате активно идущих микробиологических процессов, которые особенно заметны на глубоководных горизонтах ст. 5225, где основную долю ОВ составляют компоненты бактериальной деструкции ОВ. Начиная с глубины 2100 м и до дна, ОВ содержится уже в следовых количествах. и н-алканы отсутствуют на хроматограммах.

Из результатов изучения гранулометрического состава лонных осалков слелует, что из р. Лены выносится хорошо сортированный грубозернистый материал, характеризующийся низким содержанием Сорг (рис. 4а). На изменение гранулометрического состава осадков и степени их сортировки на изученном разрезе помимо влияния стока р. Лена могла оказывать влияние эрозионноаккумулятивная деятельность придонных течений. Полученные данные подтверждают значительную латеральную изменчивость условий осадконакопления в районе исследования. Выявлены существенные вариации гранулометрического состава осадков на изученном разрезе. В частности, обнаружены участки дна, на которых содержание песка в осадках достигает 100% (рис. 4б). Распространение песков на шельфе в районе исследования также было описано в работах [28, 32]. Изменения гранулометрического состава наилка (0-0.5 см) повторяют характер вариаций состава поверхностных осадков на изученном разрезе (табл. 4).

Вариации состава OB донных отложений и органо-геохимические маркеры его трансформации. К процессам, контролирующим поток OB в море Лаптевых и на примыкающем к нему континентальном склоне, относятся: речной вынос; эрозия берегов; перенос осадочного вещества вниз по склону под действием гравитационных потоков; первичный синтез OB морской биотой; деятельность придонных течений [13, 43]. Арктический климат в сочетании с геологическим строением

областей сноса, динамикой и химией вод определяет характер осадочного материала, а также особенности биогеохимических и диагенетических процессов [29, 33, 43]. Основная масса ОВ, достигшая дна, разлагается/растворяется до конечных биогенных элементов на границе водадно и в поверхностном слое осадков [12, 25, 27]. Эти процессы зависят от глубины бассейна, скорости терригенной и биогенной седиментации, состава и величины латеральных и вертикальных потоков, микробиологической активности - факторов, определяющих среду осадконакопления [напр., 12, 27]. В море Лаптевых, как в Карском и Восточно-Сибирском, основное осаждение Сорг происходит в эстуарно-дельтовых и приконтинентальных зонах, где формируется мощная зона накопления осадочного материала и Соорг донных осадков [1, 2, 20, 23, 30, 44]. Карбонатный углерод (Скарб) в отложениях обнаружен не был. Сорг в донных осадках является по массе основным компонентом углеродного цикла. Это характерная черта осадков арктических морей и важная особенность осадконакопления в северной полярной зоне [13]. Полученные содержания Сорг подчиняются характерной для осадков Арктического бассейна закономерности увеличения концентрации в системе песок — алеврит — пелит (рис. 4) [13, 42]. Сопоставление значений Соорг и TLE (табл. 3) в целом показывает их пропорциональное изменение.

В образцах осадочных отложений, в отличие от образцов воды и взвеси, в составе ОВ преобладают соединения, генетически связанные с наземной растительностью, о чем свидетельствуют значения индекса С₁₅₊₁₇₊₁₉/С₂₇₊₂₉₊₃₁ < 1. Преобладание четных гомологов н-алканов в низкомолекулярной области ($OEP_{17-19} = 0.60$, в среднем) отражает значительные диагенетические преобразования морского ОВ. Обстановка осадконакопления окислительная, о чем свидетельствует отношение изопреноидов пристана к фитану (Pr/Phy > 1). На ст. 5225, расположенной в глубоководной области на континентальном склоне, в алевро-пелитовых отложениях скорости процессов бактериальной трансформации ОВ замедлены из-за значительной глубины. Это привело к повышенным значениям индекса $OEP_{17-19} = 1.24$. По разрезу в изученных осадках значение индекса нечетности н-алканов терригенного генезиса (CPI = 6.21, в среднем) указывает на незначительную степень деградации континентального ОВ.

В наилке из дельты р. Лены (ст. 5218) и на шельфе (ст. 5220) выявлены повышенные по сравнению с поверхностными осадками значения концентраций ОВ. Так же, как и в подстилающих осадках, в составе ОВ наилка доминируют соединения терригенного генезиса. Органо-геохимические индексы и распределения *н*-алканов сопоставимы между этими станциями (табл. 3, рис. 5). Подобная картина была описана в работе [7] по Карскому морю, что свидетельствует о сходстве процессов трансформации ОВ при переходе от наилка к осадку.

Исключение составляет расположенная на внешнем шельфе ст. 5224. где выявлен высокий градиент изменений качественных и количественных характеристик ОВ при переходе наилок-полстилающий осадок (табл. 3. рис. 5в). Концентрация ОВ в наилке сопоставима с таковой для наилка в дельте р. Лены и составляет 606 мкг/г. Распределение н-алканов здесь носит выраженный бимодальный характер. В наилкезначительно возрастает по сравнению с другими станциями разреза доля гомологов планктоногенного генезиса (14 %) и отношение $\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 1.38$. Схожая картина распределения н-алканов с четкими маркерами планктоногенного ОВ в осадках приводится в работе [3], где пробы донных осадков были отобраны в районе внешнего шельфа осенью 2011 г. Станции отбора были расположены вблизи наших станций 5223 и 5224. Высокие значения содержания морского ОВ в данном районе, вероятно, связаны с подледным цветением. Значительная поставка на дно подледных диатомовых водорослей была зафиксирована ранее в районе между 82° и 89° с.ш. и описана в работе [21].

Известно, что в наилке резко возрастают величины общей численности микроорганизмов и интенсивность микробных процессов [7]. При переходе в зону подстилающего осадка на ст. 5224 доля маркеров гидробионтного (С₁₅₊₁₇₊₁₉) и терригенного (C₂₇₊₂₉₊₃₁) ОВ суммарно составляет всего 14%. Максимум концентраций приходится на средне-молекулярную область, маркирующую активно идущие процессы биодеградации ОВ $(\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 7.19)$ (рис. 5в). Доля компонент бактериальной деструкции здесь максимальна на всем разрезе и составляет 46% для наилка и 81% для подстилающего горизонта 0.5-1 см. Вероятно, в наилке происходит активизация процессов биодеградации ОВ и в подстилающих его песчаных осадках накапливаются компоненты бактериальной деструкции ОВ. Континентальное ОВ в осадках на ст. 5224 практически не аккумулируется. Об интенсификации микробиологических процессов в осадках в этом районе также свидетельствуют повышенные значения численности бактерий, их биомассы и концентрации свободных аминокислот [22]. Исследования проводились авторами в сентябре, поэтому сопоставление результатов с результатами нашей работы правомерно.



Рис. 4. Содержание С_{орг} (а) и распределение фракции < 63 мкм (б) в поверхностных донных осадках по собственным и литературным данным ([28, 32] с изменениями и дополнениями). Открытыми точками показаны литературные данные.

Полученный в сентябре 2015 г. комплекс данных на ст. 5215-2 наглядно демонстрирует сложность и неоднозначность взаимосвязи биологических, биогеохимических, гидрофизических и седиментационных процессов. Как было описано выше, станция расположена в зоне лавинной седиментации вещества. Здесь в поверхностном слое воды зафиксированы максимальные для шельфа значения ВОУ, а поток Сорг составлял 464 мгС/м²/сут [5]. В составе углеводородов РОВ и ВОВ преобладают н-алканы морского генезиса, при незначительной доле терригенного ОВ (8% и 9% соответственно). Ожидалось, что параметры ОВ в осадках будут соответствовать данному режиму седиментации — высокие содержания Соорг и ОВ, высокая доля соединений морского генезиса, повышенные значения индексов ОЕР₁₇₋₁₉

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

и СРІ. Однако проведенные исследования показывают минимальные на разрезе значения Соорг (0.38%), концентрации ОВ (69.3 мкг/г), н-алканов (0.69 мкг/г) и маркеров морской биоты ($C_{15+17+19}$ / $/C_{27+29+31} = 0.11$, $\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 0.33$). В условиях малой глубины (26 м) и значительного количества оседающего вещества, полная биодеградация оседающего ОВ в результате бактериальной деструкции маловероятна. При этом в осадках, представленных на 100% грубозернистой песчаной фракцией, показаны значительные концентрации слабо преобразованного континентального OB (CPI = 6.59, C₂₇₊₂₉₊₃₁ = 81.7 мкгС/г). Объяснением такого эффекта может быть активная деятельность придонных течений, однако данные, подтверждающие или опровергающие это предположение, отсутствуют.


Рис. 5. Распределение *н*-алканов в наилке (0–0.5 см) и подстилающих донных осадках, отобранных: (а) в дельте р. Лена, ст. 5218; (б) на шельфе, ст. 5220; (в) на континентальном склоне, ст. 5224 меридионального разреза моря Лаптевых в сентябре 2015 г. в % на сумму *н*-алканов.

Таким образом, четкие градиенты были выявлены и прослежены на расстоянии 700 км от берега, как в источниках поставки, так и в степени деградации ОВ водной толщи, наилка и поверхностных донных осадков. Подобная разница была обнаружена и описана в работе Карлссон и др. [34] при исследовании образцов взвеси и осадков в заливе Буор-Хая. В указанной работе авторы предполагают, что во взвеси переносится терригенное ОВ почв и наземной растительности, обладающее малой устойчивостью и более высокой биодоступностью. В донных осадках, наоборот, происходит накопление устойчивого к деградации терригенного OB, ассоциированного с минеральными частицами термоабразии берегового комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На меридиональном разрезе в восточной части моря Лаптевых (63-й рейс НИС "Академик Мстислав Келдыш", сентябрь 2015 г.) определены содержание органического углерода и состав нормальных углеводородов в воде, взвеси, наилке и донных осадках. Одновременное исследование качественного и количественного составов *н*-алканов в этих объектах на одних и тех же станциях на разрезе р. Лена — континентальный склон было проведено впервые. На основании аналитических определений и литературных данных прослежены источники поставки и пути трансформации OB.

В предыдущих работах неоднократно было показано преобладание терригенного ОВ в осадках моря Лаптевых. Приведенные в данной работе результаты полностью подтверждают этот вывод. При этом ранее неоднократно отмечалось, что на формирование состава ОВ донных осадков сушественное влияние оказывает ОВ, поступающее с речным стоком в растворенной и взвешенной формах. Полученные нами результаты показывают принципиальное отличие составов ОВ растворенной и взвешенной форм от состава ОВ донных осадков. Согласно изученным геохимическим маркерам, в РОВ и ВОВ наблюдается тренд на увеличение доли морского ОВ с увеличением дистанции от берега. При этом терригенное ОВ водной толщи имеет минорные концентрации и значительно преобразовано. Однако на тех же станциях в донных осадках накапливается устойчивое терригенное ОВ с низкой степенью диагенетической трансформации. Отсутствие маркеров гидробионтов в осадках является следствием разложения морского ОВ в толще воды, что приводит к сравнительно меньшему поступлению в них автохтонного материала. Исключение составляет ст. 5224 (внешний шельф), где выявлены признаки экспорта биомассы водорослей из тающего арктического морского льда.

Из полученных результатов следует, что ОВ вод речного стока р. Лены в летний период не способствует формированию ОВ донных осадков. Оно формируется за счет других механизмов, недостаточно изученных к настоящему моменту. Это может быть поставка материала с водами паводкового стока р. Лены, переотложение под действием придонных течений, ледовый разнос или совокупность этих процессов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают свою благодарность Н.В. Лобусу за предоставленный материал для исследований, Н.А. Беляеву, Д.Г. Борисову за ценные рекомендации при интерпретации результатов, научному составу и экипажу НИС "Академик Мстислав Келдыш", начальнику экспедиции академику М.В. Флинту.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН, тема № FMWE-2024-0019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Беляев Н.А., Поняев М.С., Кирютин А.М. Органический углерод воды, взвеси и верхнего слоя донных осадков центральной части Карского моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 563–576.
- 2. Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В. и др. Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геохимия. 2008. № 2. С. 183–195.
- Гершелис Е.В. Геохимические особенности органического вещества донных осадков в морях Восточной Арктики : Дисс. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.09 Томск, 2018. 143 с.
- 4. Демидов А.Б., Гагарин, В.И., Арашкевич, Е.Г. и др. Пространственная изменчивость первичной продукции и хлорофилла в море Лаптевых в августе-сентябре // Океанология. 2019. Т. 59. № 5. С. 755–770.
- 5. Дриц А.В., Кравчишина М.Д., Пастернак А.Ф. и др. Роль зоопланктона в вертикальном потоке вещества в Карском море и море Лаптевых в осенний сезон // Океанология. 2017. Т. 57. № 6. С. 934–948.
- Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития / Под ред. Кассенс Х. и др. М.: Изд-во МГУ, 2009. 608 с.
- 7. Леин А.Ю., Маккавеев П.Н., Саввичев А.С. и др. Процессы трансформации взвеси в осадок в Карском море // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 643–679.
- Лисицын А.П. Маргинальные фильтры и биофильтры Мирового океана // Океанология на старте XXI века. М.: Наука, 2008. С. 159–224.
- 9. *Немировская И.А.* Распределение и происхождение углеводородов на трансарктическом разрезе через моря Сибири // Океанология. 2021. Т. 62. № 2. С. 209–219.
- Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В. и др. Геохимия полициклических ароматических углеводородов донных осадков Восточно-Арктического шельфа // Океанология. 2008. Т. 48. С. 215–223.
- Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В. и др. Геохимия органического вещества донных отложений Центрально-Арктических поднятий Север-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

ного Ледовитого океана // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. С. 113–125.

- 12. *Романкевич А. Е., Ветров А. А.* Углерод в мировом океане. М.: ГЕОС. 2021. 352 с.
- 13. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях Росии. М.: Наука, 2001. 302 с.
- 14. Степанова С.В., Полухин А.А., Костылева А.В. Гидрохимическая структура вод в восточной части моря Лаптевых осенью 2015 г. // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 67–74.
- Суханова И.Н., Флинт М.В., Георгиева Е.Ю. и др. Структура сообществ фитопланктона в восточной части моря Лаптевых // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 86–102.
- 16. Флинт М.В., Арашкевич Е.Г., Артемьев В.А. и др. Экосистемы морей Сибирской Арктики. Материалы экспедиционных исследований 2015 и 2017 гг. М.: АПР, 2018. 232 с.
- 17. Alling V., Sanchez-Garcia L., Porcelli D. et al. Nonconservative behavior of dissolved organic carbon across the Laptev and East Siberian seas // Global Biogeochem. Cycles. 2010. V. 24. P. 1–15.
- Alling V., Porcelli D., Mörth C.-M. et al. Degradation of terrestrial organic carbon, primary production and out-gassing of CO2 in the Laptev and East Siberian Seas as inferred from δ13C values of DIC // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. V. 95. P. 143–159.
- Amundsen H., Anderson L., Andersson A. et al. AMAP assessment 2013: Arctic Ocean acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme // AMAP, 2013. P. 111.
- 20. *Belyaeva A.N., Eglinton G.* Lipid biomarker accumulation in the Kara Sea sediments // Oceanology. 1997. V. 37. P. 634–642.
- 21. Boetius A., Albrecht S., Bakker K. et al. Export of algal biomass from the melting Arctic sea ice // Science. 2013. № 339. P. 1430–1432.
- 22. *Boetius A., Damm E.* Benthic oxygen uptake, hydrolytic potentials and microbial biomass at the Arctic continental slope // Deep Sea Res. Part I. 1998. № 45. P. 239–275.
- 23. *Bröder L., Tesi T., Andersson T.I. et al.* Historical records of organic matter supply and degradation status in the East Siberian Sea // Org. Geochem. V. 91. P. 16–30.
- Bröder L., Tesi T., Salvadó J.A. et al. Fate of terrigenous organic matter across the Laptev Sea from the mouth of the Lena River to the deep sea of the Arctic interior // Biogeosciences. 2016. V. 13. P. 5003-5019.
- 25. *Burdige D.J.* Preservation of organic matter in marine sediments: controls, mechanisms, and an imbalance in sediment organic carbon budgets? // Chemical reviews. 2007. V. 107. №. 2. P. 467–485.
- Damm E., Bauch D., Krumpen T. et al. The transpolar drift conveys methane from the siberian shelf to the central Arctic Ocean // Sci. ReP. 2018. V. 8. P. 1–10.

- Eglinton T.I., Repeta D.J. Marine organic geochemistry // Treatise on Geochemistry, 2004 P. 145–180.
- Fahl K., Stein R. Modern organic carbon deposition in the Laptev Sea and the adjacent continental slope: Surface water productivity vs. terrigenous input // Org. Geochem. 1997. V. 26. P. 379–390.
- 29. *Fahl K., Stein R.* Modern seasonal variability and deglacial/Holocene change of central Arctic Ocean sea-ice cover: New insights from biomarker proxy records // Earth Planet. Sci. Lett. 2012. P. 123–133.
- Fernandes M.B., Sicre M.-A. The importance of terrestrial organic carbon inputs on Kara Sea shelves as revealed by n-alkanes, OC and δ13C values // Org. Geochem. 2000. V. 31. P. 363–374.
- Folk R.L., Ward W.C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters // Journal of sedimentary petrology. 1957. V. 27. P. 3–26.
- 32. *Gershelis E., Grinko A., Oberemok I. et al.* Composition of sedimentary organic matter across the Laptev Sea shelf: Evidences from Rock-Eval parameters and molecular indicators // Water. 2020. V. 12, 3511.
- Gordeev V.V, Martin J.M., Sidorov I.S. et al. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // American Journal of Science. V. 296. P. 664–691.
- 34. Karlsson E.S., Charkin A., Dudarev O. et al. Carbon isotopes and lipid biomarker investigation of sources, transport and degradation of terrestrial organic matter in the Buor-Khaya Bay, SE Laptev Sea // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 1865–1879.
- Macdonald R.W., Sakshaug E., Stein R. The Arctic Ocean: Modern status and recent climate change // In: Stein R., Macdonald RW (Eds.). The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer-Verlag, 2004. P. 6–21.
- 36. Osadchiev A., Silvestrova K., Myslenkov S. Winddriven coastal upwelling near large river deltas in the Laptev and East-Siberian seas // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 5. P. 844.
- 37. *Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M.* The Biomarker Guide. Cambridge University Press. 2005. 1155 p.

- Sánchez-García L., Alling V., Pugach S. et al. Inventories and behavior of particulate organic carbon in the Laptev and East Siberian seas // Global Biogeochem. Cycles. 2011. V. 25. P. 1–13.
- 39. Semiletov I.P., Shakhova N.E., Pipko I.I. et al. Space-time dynamics of carbon and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay and adjacent part of the Laptev Sea // Biogeosciences. 2013. V. 10. P. 5977–5996.
- 40. *Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al.* Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // Nature Geosci. 2014. V. 7. P. 64–70.
- 41. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // Phil. Transactions of the Royal Soc. A: Math., Phys. and Eng. Sci. V. 373. P. 20140451.
- Stein R., Fahl K. The Laptev Sea: distribution, sources, variability and burial of organic carbon // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.). The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer-Verlag, 2004. P. 213–237.
- 43. *Stein R.* Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment. Elsevier, 2008. 591 p.
- 44. *Tesi T., Semiletov I., Hugelius G.* Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land-ocean continuum in East Siberia: Insights from biomarkers and carbon isotopes. // Geochim. Cosmochim. Acta. 2014. V. 133. P. 235–256.
- 45. van Dongen B.E., Semiletov I., Weijers J.W.H. et al. Contrasting lipid biomarker composition of terrestrial organic matter exported from across the Eurasian Arctic by the five great Russian Arctic rivers // Global Biogeochem. Cycles. 2008. V. 22(1).
- 46. Vonk J.E., Sánchez-García L., Van Dongen B.E. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia // Nature. 2012. № 489. P. 137–140.
- 47. Yunker M.B., Macdonald R.W., Snowdon L.R. et al. Alkane and PAH biomarkers as tracers of terrigenous organic carbon in Arctic Ocean sediments // Org. Geochem. 2011. V. 42. P. 1109–1146.

GEOCHEMICAL MARKERS OF ORGANIC MATTER TRANSFORMATION IN THE EASTERN PART OF THE LAPTEV SEA

N. A. Shulga^{*a*, #}, E. A. Romankevich^{*a*}, N. V. Vylegzhanina^{*b*}, E. A. Streltsova^{*a*}, V. Yu. Fedulov^{*a*}, and A. V. Polyakova^{*b*}

^a Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ^b Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia [#]e-mail: nash.ocean@gmail.com

The sources of supply and transformation of organic matter (OM) during the transition from the dissolved form to suspension, fluffy and bottom sediments on the meridional transect from the Lena River delta to the continental slope were described (depths from 10 to 2390 m, cruise 63 of the R/V Akademik Mstislav

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ТРАНСФОРМАЦИИ

Keldysh, September 2015). The results of the study of OM molecular markers showed that dissolved and suspended OM of marine and terrigenous origin biodegrades in the water column and practically does not accumulate in bottom sediments. Thus, OM of the Lena river runoff does not contribute to the formation of OM in the bottom sediments in the summer period. On the outer shelf, an area of influence of ice bloom on the sedimentation process was revealed.

Keywords: Laptev Sea, n-alkanes, organic matter, bottom sediments, geochemistry, Arctic

——— ХИМИЯ МОРЯ —

УДК 551.465

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ВАРИАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕРЫ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ АНАЭРОБНЫХ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2024 г. А. В. Дубинин^{1, *}, Т. П. Демидова¹, О. А. Очередник², Л. С. Семилова¹, М. Н. Римская-Корсакова¹, Е. Д. Бережная¹, Е. Н. Зологина¹

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия ²Южное отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Геленджик, Россия *e-mail: dubinin@ocean.ru

Поступила в редакцию 29.08.23 г. После доработки 04.09.23 г. Принята к публикации 16.11.23 г.

Элементная сера и ее производные полисульфиды играют ключевую роль в процессах окисления сероводорода в анаэробных бассейнах. Имея низкую растворимость, элементная сера в основном представлена взвешенными формами. Однако в сульфидных водах она образует хорошо растворимые полисульфиды. Настоящая работа посвящена исследованию элементной серы и полисульфидов в верхней части анаэробной зоны Черного моря в 2017–2019 и 2022 гг. на станциях, расположенных на континентальном шельфе у побережья Кавказа и Крыма. Отбор проб, их фильтрование и определение серы проводились в строго анаэробных условиях в атмосфере аргона.

Концентрация элементной серы (zero-valent sulfur (ZVS) — элементная сера в сумме с полисульфидами) растет с глубиной и ростом содержания сероводорода, от 0.01 в области редокс интерфейса до 0.67 мкмоль/кг на глубине 600 м. Доля элементной серы в составе ZVS составляет $23\pm5\%$. Расчет концентрации полисульфидов, находящихся в состоянии равновесия с взвешенной серой, показывает, что глубже 20-25 м от верхней границы анаэробной зоны их концентрация оказалась выше коцентрации ZVS и на глубине 600 м различались примерно в 3 раза. Преобладание элементной серы над сульфидной в составе полисульфидов на глубинах 450 и 600 м может быть причиной утяжеления ее изотопного состава на 2.2% относительно серы растворенного сульфида (-41.0% VCDT).

Ключевые слова: элементная сера, сера нулевого заряда, сероводород, Черное море, полисульфиды **DOI:** 10.31857/S0030157424020056 **EDN:** RVTGRZ

ВВЕДЕНИЕ

Элементная сера и полисульфиды играют заметную роль в окислительно-восстановительном цикле серы на поверхности Земли. Они появляются в биогенных и абиогенных процессах окисления сероводорода в меромиктических водоемах [10, 20, 21, 27].

В Черном море, крупнейшем на планете водоеме с анаэробными условиями, в прибосфорском районе в воде на горизонте глубже 90—100 м элементная сера является продуктом абиогенного окисления сульфида кислородом воды нижнебосфорского течения [21].

$$2\mathrm{HS}^{-} + \mathrm{O}_{2} \leftrightarrow 2\mathrm{S}^{0} + 2\mathrm{OH}^{-} \tag{1}$$

Элементная сера в воде на редокс интерфейсе и в толще анаэробной зоны неоднократно становилась объектом исследования [16, 23, 25]. Было показано, что концентрация элементной серы растет с глубиной и имеет максимум в верхней части анаэробной зоны до 200 nM [16]. Появление элементной серы в верхней части анаэробной зоны связано с окислением сероводорода в основном оксидом марганца [9, 15]

$$MnO_2 + HS^- + 3H^+ \leftrightarrow Mn^{2+} + 2H_2O + S^0 (2)$$

или бактериальным путем [16]

$$\mathrm{CO}_2 + 2\mathrm{H}_2\mathrm{S} \leftrightarrow 2\mathrm{S}^0 + \mathrm{C}(\mathrm{H}_2\mathrm{O}) + \mathrm{H}_2\mathrm{O}.$$
 (3)

Растворимость элементной серы (S⁰) в морской воде Черного моря весьма низкая. Ее можно оценить на основании уравнения зависимости константы реакции (*K*) растворения ромбической серы α -S₈(s) \leftrightarrow S₈(aq) от температуры, которое приводится в работе [18],

$$\ln K = -\frac{5701}{T} + 1.803,$$

где Т — температура в градусах Кельвина.

Расчеты показывают, что растворимость серы (S⁰) в морской воде Черного моря при температуре 9°С составляет 49 nM, при 25°С — 80 nM, при определении растворимой фракции фильтрование в работе [18] проводилось через фильтр с размером пор менее 0.22 мкм. В сероводородной зоне она может заметно возрастать за счет образования полисульфидов [9, 19, 20, 23]

$$HS^{-} + (n-1)S^{0} \leftrightarrow S_{n}^{2^{-}} + H^{+}.$$
 (4)

Являясь промежуточной формой при окислении сероводорода, элементная сера может диспропорционировать на сероводород и сульфат:

$$4S^{0} + 4H_{2}O \leftrightarrow 3H_{2}S + SO_{4}^{2^{-}} + 2H^{+}.$$
 (5)

Множество циклов диспропорционирования серы приводит к увеличению различий в изотопном составе серы сульфата и сульфида [10, 27].

В Черном море исследование распределения элементной серы дало противоречивые результаты. В работе [16] в верхней части анаэробной зоны идентифицирован пик концентрации элементной серы величиной 200 nM. Близкие по величине концентрации серы 30-60 nM были определены в работе [23]. Методом дистилляции с пределом обнаружения 20 nM элементная сера и полисульфиды не были обнаружены в субокислительной зоне [2]. В этой же работе было показано, что концентрация элементной серы и полисульфидов (в сумме) постепенно росла в сульфидной зоне моря вместе с концентрацией сульфидов, не образуя максимум ниже редокс интерфейса. Принимая во внимание недостаточность знаний о поведении элементной серы в анаэробной воде Черного моря и их фрагментарность, нами были предприняты многолетние исследования в 2017-2019 и 2022 гг. по изучению распределения концентраций серы нулевого заряда (zero-valent sulfur, ZVS) и взвешенной элементной серы (S⁰) с размером частиц больше 0.45 мкм. Цель настоящей работы — определить основные черты распределения серы нулевого заряда и элементной серы в воде Черного моря, рассмотреть вариации ZVS в результате многолетних наблюдений, оценить ее зависимость от концентрации сероводорода и показать доминирующую роль полисульфидов в распределении серы нулевого заряда в сульфидных водах Черного моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал для исследований отобран с помощью комплекса "Rosette", оснащенного шестью 4-литровыми батометрами Нискина. На станциях Ash10 и Ash12 в 2017 г. отбор проб проводился до глубины 320 м, а на станциях Ash13, 15-17 и 19 в 2018–2019 годах до глубины 600 м во время однодневных рейсов МНИС "Ашамба". Все вышеупомянутые станции расположены на континентальном склоне (координаты 44.489° с.ш., 37.870° в.д.) с глубиной дна 1200 м, кроме станции Ash10 (координаты 44.520° с.ш., 37.901° в.д.), расположенной ближе к берегу, с глубиной дна 500 м (рис.1). Гидрофизические измерения выполнялись СТD зондом "Sea Bird 19+" фирмы "Sea-Bird Electronics, Inc".

На станции 138.1 (координаты 44.543° с.ш., 34.533° в.д.) (рис. 1) в 142 рейсе НИС "Профессор Водяницкий" (октябрь 2022 г.) отбор проб осуществлялся двенадцатью 8-литровыми батометрами General Oceanic, а гидрофизические измерения выполнялись зондирующим комплексом Idronaut Oceanseven 320 PlusM. Станция находится на континентальном склоне Крыма, глубина водной толщи составила около 1450 м.

Отбор проб из батометров осуществлялся под небольшим давлением аргона. Для отбора проб все бутылки из полиэтилена емкостью 1 л предварительно заполнялись аргоном. Для анализа серы нулевого заряда в каждую емкость предварительно добавляли суспензию Zn₂(OH)₂CO₃ и заполняли аргоном особой чистоты 99.998%.

На станции 138.1 с каждого горизонта отбирали по две пробы массой примерно 1 кг, в одну предварительно добавляли суспензию Zn₂(OH)₂CO₂. После отбора проб бутыли хранились в холодильнике при температуре +4°С до процедуры фильтрования через фильтр 0.45 мкм Millipore в атмосфере аргона не более 3 суток. Фильтр с осадком помещали в полипропиленовую пробирку, заполненную аргоном, и плотно закрывали крышкой. До анализа фильтры хранились при температуре -20°С. Элементную серу анализировали методом отгонки сероводорода после восстановления раствором CrCl, [2]. Элементная сера, полученная в результате осаждения с Zn₂(OH)₂CO₂, представляет собой сумму взвешенной элементной серы, коллоидной элементной серы и серы разрушенных полисульфидов. Далее мы будем называть эту форму — сера с нулевым зарядом (zero-valent sulfur, ZVS) в отличие от взвешенной серы, которую мы получили фильтрованием и она представлена элементной серой (S⁰).

Для оценки воспроизводимости метода определения ZVS на станциях случайным образом отбирали и анализировали параллельные пробы,

отобранные из одного батометра. В результате для 11 пар проб в диапазоне концентраций от 0.04 до 0.34 мкмоль/кг стандартное отклонение составило 0.02 мкмоль/кг.

Сероводород анализировали спектрофотометрическим методом с метиленовым голубым в тот же день после отбора проб, добавляя пробу морской воды в раствор ацетата цинка (5 мл) [1]. Низкие концентрации сероводорода на редокс интерфейсе определялись методом дистилляции [2], предел обнаружения составил 0.01 мкМ. Концентрации растворенного кислорода анализировали методом Винклера [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Концентрации ZVS меняются от 0.01 в области редокс интерфейса до 0.67 мкмоль/кг на станции Ash17 в 2019 г. На всех станциях в разные годы наблюдения концентрация ZVS растет с увеличением условной плотности и глубины анаэробной зоны (рис. 2, табл. 1). Ни в одном случае из 8 станций не отмечено заметного максимума концентраций серы в области редокс интерфейса, который был определен ранее [16]. Обнаруженные концентрации ZVS обычно близки к пределу обнаружения (0.01 мкмоль/кг) выше горизонта, где заканчивается сероводород. Отношение ZVS к концентрации H_2S уменьшается в 1000 раз от редокс интерфейса до глубины 600 м: от 2 до 0.002 (рис. 3), что, видимо, определяется тем, что ZVS является продуктом окисления сероводорода в верхней части анаэробной зоны.

В 2017 г. концентрация ZVS была измерена на двух станциях на континентальном склоне: на станции Ash10 (глубина дна 500 м, не показана на рис. 1) и на станции Ash12 (глубина дна 1200 м). Несмотря на расстояние порядка 3 км между станциями, концентрации ZVS оказались весьма близки и менялись от 0.02 до 0.52 мкмоль/кг (табл. 1). Начиная со станции Ash12, все последующие определения элементной серы на станциях Ash производились в точке с одинаковыми координатами для оценки межгодовой и короткопериодической в течение недели изменчивости.



Рис. 1. Места расположения станций Ash (44.489° с.ш., 37.870° в.д.) и 138.1 (44.543° с.ш., 34.533° в.д.).

В 2018 г. получено три профиля ZVS на станциях Ash13, Ash15 и Ash16. Станции Ash13, Ash15 и Ash16 выполнены 7, 12 и 14 июля 2018 г. Профили элементной серы оказались весьма близки между собой, хотя в результате апвеллинга в течение недели наблюдения произошел подъем границы редокс интерфейса с глубины 169 м (плотность 16.10 кг/м³) до глубины 148 м (на 21 м) (рис. 4).

В 2019 г. на станциях Ash17 и Ash19 глубина изопикны 16.20 кг/м³ также была различной (табл. 1). На станции Ash17 (06 июля 2019 г.) она была на глубине 165 м, через неделю 12 июля граница поднялась до глубины 153 м. Этот подъем

ZVS, мкмоль/кг 0 0.1 0.2 03 04 0.5 0.6 0.7 15.80 16.00 Условная плотность, кг/м³ 16.20 16.40 16.60 16.80 17.00 17.20

Рис. 2. Изменение концентраций серы нулевого заряда в воде Черного моря в зависимости от условной плотности на станциях Ash в 2017–2019 гг. Пунктиром показана верхняя граница анаэробной зоны (условная плотность 16.10 кг/м³).

(12 м) не привел к различиям в распределении концентраций ZVS. Концентрации серы растут от появления сероводорода до глубины 400 м. Ниже на станции Ash19 они уменьшаются в два раза с 0.40 до 0.20 мкмоль/кг. На станции Ash17 распределение элементной серы с глубиной оказалось весьма похожим (табл. 1).

На станции 138.1 (рис. 1) 7 октября 2022 г. были получены элементная сера (S⁰) и ZVS (табл. 2). Начиная от области редокс интерфейса (150 м), с появлением и ростом концентрации сероводорода концентрация ZVS возрастает от 0.07 до 0.20–0.26 мкмоль/кг до глубины 400 м



Рис. 3. Изменение величины ZVS/H₂S в водной толще анаэробной зоны Черного моря на станциях Ash. Пунктиром показана верхняя граница анаэробной зоны (в среднем 160 м).



Рис. 4. Распределение ZVS на станциях Ash13 (1), Ash15 (2) и Ash16 (3) в поле плотности (а) и с глубиной (б). Пунктиром показан редокс интерфейс.

Глубина, м	Условная плот- ность, кг/м ³	Н₂S, мкМ	ZVS, мкмоль/кг	Глубина, м	Условная плот- ность, кг/м ³	Н₂S, мкМ	ZVS, мкмоль/кг
	Станция	Ash10			Станция	Ash15	
135	15.98	0.0	0.02	160	16.30	6.9	0.19
145	16.10	0.0	0.03	170	16.36	11.1	0.20
151	16.15	0.6	0.06	180	16.42	18.1	0.18
151	16.15	0.6	0.05	203	16.50	25.1	0.19
156	16.19	2.6	0.09	300	16.79	79.0	0.38
156	16 19	2.6	0.08	361	16.89	105	0.34
162	16.25	5.4	0.12	480	16.99	151	0.37
175	16.25	13.5	0.16	540	17.04	171	0.46
105	16.35	13.5 22.2	0.17	600	17.07	196	0.47
234	16.60	40.1	0.21	1.40	Станция	Ash16	
234	16.65	40.1	0.21	149	16.24	1.9	0.14
240	16.03	49.5	0.22	180	16.46	17.8	0.18
200	16.70	5/./	0.31	300	16./9	/1.5	0.33
295	16.75	/1.1	0.39	420	16.95	12/	0.50
321	16.79	83.8	0.27	4/1	16.99	148	0.38
	Станция А	Ash12	I	521	17.03	104	0.40
146	16.00	0.01	0.02	570	17.06	184 107	0.41
156	16.09	0.08	0.04	601	17.08 Столица	197 Ach17	0.39
158	16.15	0.56	0.05	160		ASII17	0.01
161	16.21	2.52	0.09	100	16.18	0.0	0.01
164	16.24	5.4	0.08	170	16.26	0.8	0.18
179	16.35	12.9	0.13	199	16.43).5 18 7	0.21
196	16.45	22.4	0.23	249	16.65	43.7	0.32
243	16.60	39.5	0.30	300	16.05	74 7	0.32
265	16.65	48.4	0.32	349	16.85	93.8	0.40
281	16.70	56.5	0.32	419	16.93	120	0.43
304	16.75	66.1	0.45	470	16.97	141	0.42
321	16.78	71.2	0.52	521	17.01	157	0.50
	Станция Д	Ash13	I	571	17.05	180	0.26
160	16.13	0.01	0.03	601	17.06	186	0.67
170	16.23	1.11	0.11		Станция	Ash19	
180	16.32	79	0.19	152	16.17	0.40	0.06
100	16.32	19.8	0.22	170	16.34	10.6	0.19
250	16.65	19.0	0.32	180	16.42	19.0	0.18
201	16.03	40.0 67.0	0.32	200	16.52	30.5	0.30
501 251	10.77	07.9	0.33	250	16.69	54.6	0.34
331	10.84	95.0	0.37	301	16.80	78.7	0.42
400	10.91	113	0.3/	350	16.87	98.1	0.36
451	16.96	136	0.42	401	16.93	114	0.41
500	16.99	153	0.44	450	16.98	139	0.19
552	17.03	171	0.43	501	17.02	156	0.23
600	17.06	190	0.53	550	17.05	180	0.22

Таблица 1. Концентрации серы нулевого заряда (ZVS) и сероводорода с изменением глубины и условной плотности на станциях серии Ash

(рис. 5), оставаясь далее постоянной. При этом концентрация сероводорода увеличивалась от 121 до 336 мкМ. Выше интерфейса, в субокислительной зоне, где концентрации кислорода меняются от 1.6 до 7.3 мкМ, концентрации элементной серы и ZVS постепенно снижаются, достигая предела обнаружения (0.01 мкмоль/кг).

В распределении взвешенной элементной серы (рис. 5б) наблюдается заметный максимум на горизонтах 150-250 м, концентрация S⁰ достигает величины 9.95 мкмоль/кг. Появление этого максимума S⁰ на 4-х горизонтах, вероятно, связано с деятельностью фототрофных анаэробных бактерий в пробах уже после отбора проб воды на судне [3]. Фототрофные бактерии, используя свет, окисляют сероводород (уравнение 3) [16, 24, 261. В пробах для определения ZVS такого эффекта не наблюдается. При определении ZVS осаждение сероводорода в форме ZnS при добавлении Zn₂(OH)₂CO₂ не дает возможности окислять сероводород бактериальным путем, что приводит к отсутствию формирования максимума серы ZVS в тех же пробах в строго анаэробных условиях. На глубинах более 250 м S⁰ слабо изменяется от 0.04 до 0.06 мкмоль/кг. не показывая связи с ростом концентрации сероводорода. Ниже глубины 400 м доля S⁰ составляет около $23 \pm 5\%$ от ZVS. Остальные 77% серы в форме ZVS, по-вилимому, представлены полисульфилами и (возможно) коллоидной элементной серой.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все полученные результаты вне зависимости от времени наблюдения подчиняются общим за-

кономерностям: ZVS растет с глубиной и увеличением концентрации сероводорода (рис. 2, 4, 5). В области редокс интерфейса с применением ингибирующей бактериальное окисление сероводорода добавки в виде суспензии Zn₂(OH)₂CO₂ сера не показывает максимума, который, например, обнаружен в бассейне Кариако [22]. Данные по ZVS представляют сумму двух форм собственно элементную серу и полисульфиды, причем полисульфиды ниже 400 м составляют порядка 77% от общей концентрации ZVS по результатам проведенных исследований на станции 138.1. Так как количество полисульфилов прямо связано с содержанием растворенных сульфидов (уравнение 4), то можно предполагать, что увеличение ZVS с глубиной и ростом сульфилов связано с увеличением доли полисульфидов.

В верхней части анаэробной зоны определимые количества серы появляются вместе с сероводородом. Элементная сера — один из основных продуктов окисления сульфида оксидами марганца [9, 15]. Окисление оксидами марганца идет до сульфата, однако большая часть сульфида окисляется абиогенным путем до элементной серы в первые минуты после начала реакции (уравнение 2) [9].

Поскольку глубина редокс интерфейса в разные годы на станциях серии Ash довольно сильно менялась, мы рассмотрели вариации элементной серы (ZVS) относительно условной плотности (рис. 2). Все наблюдения на станциях Ash производились в июле, местоположение станции посещалось 2 раза в 2017 г., 3 раза в течение недели в 2018 г. и три раза в 2019 г. Редокс интерфейс (изопикна 16.10) заметно менялся по глубине

Таблица 2. Концентрации элементной серы, ZVS и сероводорода относительно глубины и условной плотности на станции 138.1

Глубина, м	Условная плотность, кг/м ³	О ₂ *, H ₂ S , мк M	ZVS, мкмоль/кг	S ⁰ , мкмоль/кг
128	15.91	7.3*	0.01	0.01
134	16.00	3.4*	0.02	0.01
142	16.09	1.6*	0.03	0.01
150	16.20	1.6	0.07	0.19
161	16.30	5.8	0.08	0.63
183	16.43	16.1	0.07	4.90
251	16.68	48.0	0.13	9.95
400	16.92	121	0.17	0.05
599	17.07	203	0.22	0.05
900	17.17	290	0.26	0.04
1100	17.20	325	0.22	0.06
1299	17.21	336	0.20	0.04

Примечание. В столбце концентраций сероводорода со звездочкой приведены концентрации растворенного кислорода.



Рис. 5. Изменение концентраций ZVS (1) и элементной серы (S⁰) (2) в воде Черного моря на станции 138.1 (7 октября 2022 г.) относительно плотности (а) и глубины моря (б). Пунктиром показан редокс интерфейс.

во все годы наблюдений. Наиболее заметно он смещался в 2018 г. (рис. 4).

Появление сероводорода происходит в интервале плотности 16.10-16.20 кг/м³. Чтобы оценить вариации ZVS в разные годы, были построены гистограммы данных для определенных величин условной плотности: 16.2, 16.4, 16.8 и 17.0 кг/м³, которые попадают в интервал ±0.1 кг/м³. Среднее значение для изопикны 16.2 составляет 0.09 ± 0.06 мкмоль/кг для 14 образцов, на 16.4 эта величина равна 0.20 ± 0.03 м
кмоль/кг для 13 измерений. Для условной плотности 16.8 и 17.0 средние значения не различаются в пределах величины стандартного отклонения 0.39 ± 0.10 мкмоль/кг (n = 12) и 0.40 ± 0.11 мкмоль/кг (n = 20), свидетельствуя о том, что на глубине этих изопикн различий в концентрации ZVS в разные годы наблюдений нет (рис. 6).

Зависимость между концентрациями сероводорода и элементной серы (ZVS) имеет степенной вид (рис. 7):

$$[H_2S] = 1490.18 \times [ZVS]^{2.75}, R^2 = 0.894.$$

Концентрация серы выше редокс интерфейса всегда находится на пределе обнаружения (0.01 мкмоль/кг), иногда достигая 0.03 мкмоль/кг (рис. 2, 4, 5 и табл. 1 и 2). Она возрастает ниже интерфейса при появлении сероводорода. Градиент концентрации ZVS с глубиной уменьшается, достигая практически нуля глубже 400 м (рис. 2 и 7). Величина ZVS складывается из элементной серы и полисульфидов. Глубже 400 м на станции 138.1 количество полисульфидов практически не меняется и равно 77% от ZVS. Предполагая равновесие в системе $H_2S - S^{2-}_n - S_8(aq) - \alpha - S_8$, мы попытались оценить возможные концентрации полисульфидов в воде Черного моря (уравнение 4), используя термодинамические данные образования полисульфидов, приведенные в работе [19]. Согласно уравнению 4, концентрация полисульфидов в растворе морской воды будет равна

$$[\mathbf{S}_n^{2-}] = e^{-\frac{\Delta G}{RT}} \times a_{S^0} \times [\mathbf{HS}^-] \times \gamma_{\mathbf{HS}^-} / \left(10^{-p\mathbf{H}} \times \gamma_{\mathbf{S}_n^{2-}}\right),$$

где R = 0.00831 (кДж/моль K), T — температура в градусах Кельвина (К), ΔG — энергия образования Гиббса (кДж/моль) [12]. Расчеты проводили для температуры 9-10°С при изменении рН морской воды в диапазоне 7.57-7.49 в зависимости от глубины моря. Для рН использованы наши неопубликованные данные для станции 2344 [4], которая расположена на месте исследуемых станций Ash и была отобрана в сентябре 2005 года. Коэффициент активности _{унз}рассчитывался на основании уравнения Девиса [20] для ионной силы воды Черного моря 0.48-0.56 мМ в зависимости от глубины и солености, а концентрация [HS⁻] была получена расчетом на основании констант диссоциации сероводородной кислоты $k_1 = 1.05 \times 10^{-7}$ и $k_2 = 2.5 \times 10^{-13}$ для солености 18-22 psu и температуры 10°С [5]. По данным [8] полисульфиды с длиной цепи > 3 атомов серы представлены ионизированными формами (S²⁻ более 90%) при рН 7.5–7.6 – характерных величин для рассматриваемых глубин в Черном море. По этой причине мы будем полагать, что полисульфиды представлены только формой

294



Рис. 6. Гистограммы частоты встречаемости концентраций ZVS на изопикнах 16.2 (а), 16.4 (б), 16.8 (в) и 17.0 (г) в интервале ±0.1 кг/м³.

 S_n^{2-} и рассчитанные коэффициенты активности $\gamma_{S_n^{2-}}$ на основании уравнения Девиса будут близкими к 0.24. Активность элементной серы не равна 1 [14]. Согласно расчетам она меняется с глубиной водной толщи Черного моря от 0.9 вблизи редокс интерфейса до 0.34 на глубине 600 м [14]. Эти данные в виде зависимости a_{S^0} относительно lg ($\Sigma S^0/\Sigma S^{2-}$) приводятся для растворов морской воды с ионной силой 0.65 мМ при температуре 10°С и для pH 7.5 [14]. Величина ΣS^0 аналогична ZVS и намного меньше величины ΣS^{2-} , которая представлена сероводородом без добавки сульфидной серы полисульфидов, так как $\Sigma S^0 \le \Sigma S^{2-}$.

В результате мы получим, что наиболее распространенным полисульфидом является пентасульфид. Распространенность полисульфидов с длиной цепочек n = 4-6 в 10–100 раз больше остальных (рис. 8). Расчетные концентрации полисульфидов (n = 4-8) растут пропорционально концентрации сероводорода и достигают 2.1 мкМ в сумме при содержании сульфида 200 мкМ на глубине 600 м. Это в 3 раза выше наших максимальных результатов — 0.67 мкмоль/кг. Рас-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

считанная концентрация полисульфидов равна данным определений ZVS при концентрации сероводорода меньше 10 мкМ в зоне интенсивного окисления сероводорода (рис. 7). Глубже 20–25 м от редокс интерфейса концентрация ZVS становится меньше рассчитанной в виде полисульфидов. Полисульфиды весьма активно участвуют в процессах преобразования форм серы, их пониженное количество может быть связано с их потреблением в толще сероводородной зоны, а не с низкой скоростью образования [9].

Сравнение двух форм элементной серы (ZVS и элементной) после фильтрации через фильтры 0.45 мкм показало, что порядка 77% серы ниже глубины 400 м находится в виде полисульфидов (рис. 56). Этот факт в основном подтверждает наши расчеты выше о том, что основной формой ZVS являются полисульфиды. Полученные нами изотопные составы серы ZVS на глубине 450 и 600 м показали, что она обогащена 34 изотопом серы на 2.2‰ относительно серы сероводорода [3]. Мы полагали [3], что подобный эффект может быть связан с аноксигенным окислением

ДУБИНИН и др.



Рис. 7. Распределение концентраций ZVS с увеличением сероводорода с глубиной водной толщи (до 600 м) в анаэробной зоне Черного моря. Черной линией показана эмпирическая зависимость $[H_sS] = 1490.18 \times [ZVS]^{2.75}$, $R^2 = 0.894$. Синий пунктир — расчетное количество полисульфидов по термодинамическим данным (детали приведены в тексте). На вставке — распределение ZVS в зависимости от H_sS в верхней части анаэробной зоны.

сульфида бактериальным сообществом. В частности, подобный эффект дают фототрофные бактерии [26]. Однако глубины 450 и 600 м находятся далеко за пределами фотической зоны и даже особая чувствительность фототрофных бактерий к свету [24] не позволит реализоваться подобному сценарию. Реакция сульфида и элементной серы при образовании полисульфидов приводит к абиогенному накоплению тяжелого изотопа серы в цепочках полисульфидов [7]. Измеренный изотопный состав серы (+3.4‰) полисульфидов (n = 7) в приведенной работе показал, что цепи полисульфидов содержат больше изотопа серы 34, чем это обусловлено смешением реагирующих сульфида и серы по химической реакции (4).



Рис. 8. Расчетные концентрации полисульфидов на глубине 600 м в анаэробной зоне Черного моря (детали расчетов приведены в тексте).

Причем количество ³⁴S изотопа растет пропорционально длине цепи полисульфидов при n = 4-7.

Используемая методика определения ZVS осаждение форм серы основным карбонатом цинка — неизбирательна к взвешенным формам серы. Она переводит в осадок взвешенную и частично коллоидную серу, а также разрушает полисульфиды. После фильтрования в осадке остаются взвешенные частицы, которые присутствовали в воде, в том числе сера в органической форме и в форме пирита. Однако органическая сера не извлекается по используемой методике [13], а доля серы в составе пирита в Черном море очень мала [11]. Она составляет менее 0.2%, если сравнивать поток пирита и общего органического углерода в осаждающихся частицах в водной толще Черного моря. Так как концентрация взвешенного общего органического углерода в анаэробной зоне варьирует от 2 до 5 мкМ [11, 17], то концентрация пирита во взвеси составит не более 0.01 мкМ, что является пределом обнаружения нашей методики определения ZVS. О незначительной доле пирита в составе взвешенного вещества свидетельствует изотопный состав серы пирита. Изотопный состав серы пирита практически не отличается от такового для сероводорода (-41...-42% VCDT) [11]. В то время как сера нулевого заряда оказалась тяжелее сероводорода на 2.2‰ [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние исследования (2017–2019 и 2022 гг.) распределения элементной серы (ZVS) в Черном море показывают, что ее концентра-

ция растет с глубиной анаэробной зоны и увеличением концентрации сероводорода. Сера нулевого заряда (элементная сера + сера полисульфидов) оказалась близка к пределу обнаружения 0.01 мкмоль/кг в субокислительной зоне моря и растет максимально до 0.67 мкмоль/кг на глубине 600 м на кавказском континентальном склоне. Межгодовые и в течение недели исследования ZVS показали ее постоянство в слоях с условной плотностью 16.80 ± 0.10 и 17.0 \pm 0.10 кг/м³, которые соответствуют глубинам 300 и 500 м соответственно. Исследования элементной серы и ZVS на континентальном склоне Крыма показали, что элементная сера на глубинах больше 400 м составляет в среднем 23% от ZVS, большая часть этой формы (77%) представлена полисульфидами.

Концентрации полисульфидов, полученные расчетным путем на основании термодинамических данных, совпадают с экспериментальными данными по ZVS у верхней границы анаэробной зоны (до концентрации $H_2S < 10$ мкМ). Глубже 20 м от границы редокс интерфейса расчетные данные превышают измеренные концентрации ZVS.

Преобладание полисульфидов ниже 400 м в анаэробной зоне может быть причиной появления изотопно тяжелой элементной серы на этих глубинах. Изотопный состав серы, измеренный на глубинах 450 и 600 м, оказался на 2.2‰ тяжелее серы растворенного сульфида [3]. В условиях низкой бактериальной активности на этих глубинах в Черном море наиболее вероятной причиной появления изотопно тяжелой серы может быть сера полисульфидных цепочек.

Источники финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00355, https://rscf.ru/ project/23-27-00355/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Дубинин А.В., Демидова Т.П., Кременецкий В.В. и др. Определение восстановленных форм серы в анаэробной зоне Черного моря: сравнение методов спектрофотометрии и иодометрии // Океанология. 2012. Т. 52. № 2. С. 200–209.
- 2. Дубинин А.В., Демидова Т.П., Римская-Корсакова М.Н. и др. Определение восстановленных форм серы в воде анаэробных бассейнов // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 1. С. 37–51. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-1-37-51
- 3. Дубинин А.В., Демидова Т.П., Семилова Л.С. и др. Элементная сера и ее изотопный состав в воде Черного моря // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 1. С. 24–30. https://doi.org/10.31857/S2686739723600480

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

- 4. Дубинин А.В., Дубинина Е.О. Изотопный состав кислорода и водорода вод Черного моря как отражение динамики водных масс // Океанология. 2014. № 6. С. 763–780.
- 5. Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М. Морская вода (справочное руководство). М: Наука, 1979. 327 с.
- 6. Якушев Е.В., Виноградова Е.Л., Дубинин А.В. и др. Об определении низких концентраций кислорода методом Винклера // Океанология. 2012. № 1. С. 131–138.
- Amrani A., Kamyshny A., Lev O. et al. Sulfur Stable Isotope Distribution of Polysulfide Anions in an (NH₄)₂S_n Aqueous Solution // Inorg. Chem. 2006. V. 45. P. 1427–1429. https://doi.org/10.1021/ic051748r
- Avetisyan K., Kamyshny Jr. A. Thermodynamic constants of formation of disulfide anion in aqueous solutions // Geochim. Cosmochim. Acta. 2022. V. 325. P. 205–213. https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.02.03
- Avetisyan K., Zweig I., Luther G.W. et al. Kinetics and mechanism of polysulfides and elemental sulfur formation by a reaction between hydrogen sulfide and δ-MnO₂ // Geochim. Cosmochim. Acta. 2021. V. 313. P. 21–37.

https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.08.022

- Canfield D.E. Biogeochemistry of sulfur isotopes // In: Valley J.W., Cole D.R. (Eds.). Stable isotope geochemistry. Berlin, Boston: De Gruyter, 2001. P.607-636.
- Dubinin A.V., Demidova T.P., Dubinina E.O. et al. Sinking particles in the Black Sea Waters: Vertical Fluxes of Elements and Pyrite to the Bottom, Isotopic Composition of Pyrite Sulfur, and Hydrogen Sulfide Production // Chemical Geology. 2022. P. 606. https://doi. org/10.1016/j.chemgeo.2022.120996
- Findlay A.J., Gartman A., MacDonald D. J. et al. Distribution and size fractionation of elemental sulfur in aqueous environments: The Chesapeake Bay and Mid-Atlantic Ridge // Geochim. Cosmochim. Acta. 2014. V. 142. P. 334–348. http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2014.07.032
- Gröger J., Franke J., Hamer K. et al. Quantitative Recovery of Elemental Sulfur and Improved Selectivity in a Chromium-Reducible Sulfur Distillation // Geostandards and Geoanalytical Research. 2009. V. 33. № 1. P. 17–27.
- 14. *Helz G*. Activity of zero-valent sulfur in sulfidic natural waters // Geochem Trans. 2014. V. 15. P. 38–58.
- 15. *Henkel J.V., Dellwig O., Pollehne F. et al.* A bacterial isolate from the Black Sea oxidizes sulfide with manganese (IV) oxide // Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). 2019. V. 116. № 25. P. 12153–12155.
- 16. Jørgensen B.B., Fossing H., Wirsen C.O. et al. Sulfide oxidation in the anoxic Black Sea chemocline // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research

Papers, Black Sea Oceanography: Results from the 1988 Black Sea Expedition 38, 1991. P. S1083–S1103.

- Kaiser D., Konovalov S., Schulz-Bull D.E. et al. Organic matter along longitudinal and vertical gradients in the Black Sea // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2017. V. 129. P. 22–31. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.09.006
- Kamyshny Jr A. Solubility of cyclooctasulfur in pure water and sea water at different temperatures // Geochim. Cosmochim. Acta. 2009. V. 73. P. 6022–6028.
- Kamyshny Jr A., Gun J., Rizkov D. et al. Equilibrium distribution of polysulfide ions in aqueous solutions at different temperatures by rapid single phase derivatization // Environ. Sci. Technol. 2007. V. 41. P. 2395–2400.
- Kamyshny Jr A., Zilberbrand M., Elkeltchik I. et al. Speciation of polysulfides and zerovalent sulfur in sulfide-rich water wells in southern and central Israel // Aquatic Geochem. 2008. V. 14. P. 171–192.
- 21. *Konovalov S.K., Luther G.I.W., Friederich G.E. et al.* Lateral injection of oxygen with the Bosporus plume—fingers of oxidizing potential in the Black Sea // Limnology and Oceanography. 2003. V. 48. P. 2369–2376.

https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.6.2369

 Li X., Cutter G.A., Thunell R.C. et al. Particulate sulfur species in the water column of the Cariaco Basin // Geochim. Cosmochim. Acta. 2011. V. 75. P. 148–163.
 https://doi.org/10.1016/j.gog.2010.00.020

https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.09.039

- Luther III G.W., Church T.M., Powell D. Sulfur speciation and sulfide oxidation in the water column of the Black Sea // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, Black Sea Oceanography: Results from the 1988 Black Sea Expedition. 1991. V. 38. P. S1121–S1137. https://doi.org/10.1016/S0198-0149(10)80027-5
- Marschall E., Jogler M., Henβge U. et al. Large-scale distribution and activity patterns of an extremely lowlight-adapted population of green sulfur bacteria in the Black Sea // Environmental Microbiology. 2010. V. 12. N. 5. P. 1348–1362.
- Volkov I.I., Neretin L.N. Hydrogen Sulfide in the Black Sea // In: Kostianoy A.G., Kosarev A.N. (Eds.). The Black Sea Environment, The Handbook of Environmental Chemistry. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. P. 309–331. https://doi. org/10.1007/698_5_083
- Zerkle A.L., Farquar J., Johnston D.T. et al. Fractionation of multiple sulfur isotopes during phototrophic oxidation of sulfide and elemental sulfur by a green sulfur bacterium // Geochim. Cosmochim. Acta. 2009. V. 73. P. 291–306.
- Zopfi J., Ferdelman T.G., Fossing H. Distribution and fate of sulfur intermediates — sulfite, tetrathionate, thiosulfate, and elemental sulfur — in marine sediments // In: Amend J.P. et al (Eds.) Sulfur biogeochemistry—Past and present. Geological Society of America Special Paper. Boulder, Colorado. 2004. V. 379. P. 97–116.

DISTRIBUTION AND VARIATIONS OF ELEMENTAL SULFUR IN THE UPPER PART OF THE BLACK SEA ANOXIC WATER COLUMN

A. V. Dubinin^{*a*, #}, T. P. Demidova^{*a*}, O. A. Ocherednik^{*b*}, L. S. Semilova^{*a*}, M. N. Rimskaya-Korsakova^{*a*}, E. D. Berezhnaya^{*a*}, and E. N. Zologina^{*a*}

^a Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ^b Southern Branch of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Gelendzhik, Russia [#]e-mail: dubinin@ocean.ru

Elemental sulfur and its derivatives polysulfides play a key role in the processes of hydrogen sulfide oxidation in anoxic basins. Having low solubility, elemental sulfur is mainly represented by suspended forms. However, in sulfide waters it forms highly soluble polysulfides. This work is devoted to the study of elemental sulfur and polysulfides in the upper part of the Black Sea anoxic zone in 2017–2019 and 2022 at stations located on the continental shelf off the coast of the Caucasus and Crimea. Sampling, filtering and determination of sulfur were carried out under strictly anaerobic conditions in an argon atmosphere.

The concentration of elemental sulfur (together with polysulfides) increases with depth and with an increase in the content of hydrogen sulfide from 0.01 in the area of the redox interface to 0.67 μ mol/kg at a depth of 600 m. The fraction of elemental sulfur in the composition of ZVS is $23 \pm 5\%$. The calculation of the polysulfides concentration in equilibrium with suspended sulfur based on thermodynamic data shows that deeper than 20–25 m of the upper boundary of the anoxic zone, their concentration was higher than ZVS and at a depth of 600 m they differed by about 3 times. The predominance of elemental sulfur over sulfide sulfur in the composition of polysulfides in the anoxic zone at depths of 450 and 600 m can be the reason for the fractionation of its isotopic composition by +2.2‰ relative to the sulfur of dissolved sulfide (-41.0‰ VCDT).

Keywords: elemental sulfur, zero-valent sulfur, hydrogen sulfide, Black Sea, polysulfides

—— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ ——

УДК 574.583

БАКТЕРИОПЛАНКТОН ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

© 2024 г. Н. Д. Романова^{1, *}, М. А. Болтенкова², Е. М. Беззубова¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия ² Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, Россия

> *e-mail: NdRomanova@gmail.com Поступила в редакцию 12.07.23 г. После доработки 17.07.23 г. Принята к публикации 18.07.23 г.

Приведены данные по структурным и продукционным характеристикам бактериопланктона западной части Карского моря в начале и в середине летнего развития. В области склона желоба Св. Анны средние для столба воды величины обилия прокариот составляли 594–708 тыс. кл/мл (26.4–36.5 мгС/м³) в июне и 247–517 тыс. кл/мл (12–28 мгС/м³) в начале августа. На разрезе вдоль Новой Земли средние величины обилия бактериопланктона в столбе воды составляли 186– 554 тыс. кл/мл (8.5–30 мгС/м³) в течение недели после схода сезонного льда и 169–443 тыс. кл/мл (8–21 мгС/м³) в середине лета. Удельная продукция бактериопланктона не превышала 1.28 сут⁻¹, высокие ее величины были отмечены в верхнем прогретом слое воды, над галоклином, а также в придонных горизонтах. В начале лета была отмечена тенденция снижения продукции бактериопланктона в северо-восточном направлении. Распределение обилия гетеротрофных прокариот определялось температурой и насыщением воды кислородом, возможно в качестве косвенного показателя прошедшего "цветения" фитопланктона.

Ключевые слова: бактериопланктон, арктический микропланктон, сезонное развитие **DOI:** 10.31857/S0030157424020068 **EDN:** RVMZOT

ВВЕДЕНИЕ

Бактериопланктон, являющийся основой "микробной петли", обеспечивает реминерализацию органического вещества, созданного первичными продуцентами или поступившего извне [11]. В полярных экосистемах значение микробной компоненты планктона имеет ключевое значение, поскольку в течение полугода развитие фотосинтезирующих организмов ограничено недостатком света. В подобных условиях осмотрофные микроорганизмы, способные эффективно усваивать растворенное органическое вещество, становятся основой пищевой цепи. Одним из наиболее изученных морей Сибирской Арктики на данный момент является Карское море. Тем не менее ввиду сложностей поведения экспедиционных работ в полярном регионе большинство исследований приурочено к осеннему периоду, и данных об изменчивости активности бактериопланктона и его взаимодействии с другими компонентами в течение вегетационного сезона довольно мало [2, 5, 6]. В работе рассматриваются структурные и продукционные характеристики бактерипланктона в период активного развития фитопланктона и в середине лета в период низкой активности первичных продуцентов [10].

МЕТОДИКА

Материал был собран в рамках программы "Морские экосистемы сибирской Арктики" с 30 июля по 6 августа 2016 г. в 66 рейсе НИС "Акалемик Мстислав Келлыш" и с 22 по 26 июня 2021 г. в 83 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" (рис. 1). Для учета общей численности бактерий (ОЧБ) батометрические пробы воды с разных горизонтов, выбранных на основании гидрофизического профиля, фиксировали нейтральным раствором формальдегида (конечная концентрация 1%) и окрашивали флуоресцентным красителем SYBR GREEN I в течение 15 минут. Пробы просматривали на цитометре BD Accuri C6 в течение суток после отбора [12]. Для более точной оценки численности бактериопланктона одновременно просчитывали фильтрат, проходящий через фильтр с диаметром пор 0.2 мкм.

Для учета морфологического состава, доли прикрепленных клеток, размерных характеристик и биомассы бактериопланктона батометрические пробы воды объемом 15 мл фиксировали нейтральным раствором формальдегида (конечная концентрация 1%) и хранили в темноте до последующей обработки (не менее 3 месяцев после отбора [6]).



Рис. 1. Карта-схема района работ. ◆ — 66 рейс НИС "Академик Мстислав Келдыш"; • — 83 рейс НИС "Академик Мстислав Келдыш";

Микроскопический учет осуществляли методом прямого счета клеток, окрашенных флуорохромом DAPI [13], под люминесцентным микроскопом LeicaDM 5000В при увеличении ×1000 на черных мембранных фильтрах (Трекпор Технолоджи) с диаметром пор 0.2 мкм. Бактериальную биомассу в единицах углерода вычисляли исходя из объема бактериальных клеток [3] с использованием программы анализа изображений "ImageScopeColor M". Так как использованные методы учета численности микроорганизмов не позволяют различать домены архей и бактерий, в настоящей статье, используя термин бактериопланктон, мы подразумеваем всех гетеротрофных прокариот. Для определения бактериальной продукции и выедания бактериопланктона потребителями в 2016 г. использовали прямой метод с использованием антибиотиков-ингибиторов бактериального роста, основываясь на методике [15], в модификации для естественных местообитаний [16]. Непосредственно после отбора пробы воды разливали в 100-мл флаконы. Для учета выедания бактериопланктона нано- и микрофагами в пробы воды добавляли антибиотики (бензилпенициллин 1 мг/л, ванкомицин 200 мг/л), подавляющие размножение бактерий, но не оказывающие влияние на их потребителей [15]. В качестве контроля экспонировали пробы без антибиотиков.

300

Все эксперименты выполняли в двух повторностях. Подготовленные таким образом пробы экспонировали 8–10 часов в открытом бассейне с морской водой с естественным освещением.

В 2021 г. определение бактериальной продукции и выедания бактериопланктона потребителями проводили методом разведений [14]. Эксперимент проводили для проб из поверхностного слоя воды, а также отобранных на глубине пика флуоресценции, определенного по данным датчика Wet Labs ECO-AFL/FL, установленного на зондирующем комплексе. Пробы воды, отобранные через газ с диаметром ячеи 80 мкм для удаления крупных фракций зоопланктона, разбавляли безбактериальной водой с того же горизонта (профильтрованной через фильтр 0.2 мкм с помощью камеры обратной фильтрации) в соотношениях 1:3,1:1 и 3:1. Также экспонировали интактную пробу воды. Объем воды в экспериментальных флаконах составлял 500 мл, все разведения выполняли в двух повторностях. Пробы выдерживали в течении лвух часов в термокамере при температуре, соответствующей горизонту отбора, после чего отбирали подпробу 1 мл для определения начальной численности с помощью цитометрии. Последующее время экспозиции составляло 24 часа, конечную численность также определяли с помощью цитометрии. Удельную скорость роста определяли для каждого из разведений. Коэффициент выедания и коэффициент чистого роста бактерий определяли из регрессионного уравнения на графике разведений относительно величины удельного роста [14].

Для выявления взаимосвязи между показателями характеристик сообщества бактериопланктона и другими факторами среды рассчитывали коэффициент ранговой корреляции Спирмена с помощью пакета программ PAST 3.14, а также модель множественной линейной регрессии с помощью RStudio. Минимальный уровень значимости принимали 0.05. Данные по распределению биогенных элементов, используемые в анализе, предоставлены А. А. Полухиным.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В июне 2021 г. работы выполнялись вдоль кромки сезонного льда (срок отступления ледового покрова с точек отбора составлял от 1 до 6 дней [1]), а также вдоль склона западного отрога желоба Св. Анны. Средние для столба воды величины обилия бактериопланктона вдоль ледовой кромки составляли от 186 до 554 тыс. кл/мл или 8.5–30 мгС/м³ (рис. 2а, б). В то же время над склоном западного отрога желоба Св. Анны, где открытая вода наблюдалась на протяжении более чем 25 суток, обилие бактериопланктона было

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

выше, составляя в среднем для столба воды 594– 708 тыс. кл/мл или 26.4–36.5 мгС/м³ (рис. 2в, г).

Вертикальное распределение в южной части разреза характеризовалось снижением обилия бактериопланктона с глубиной, наибольшие величины обилия в столбе воды были отмечены над галоклином, тогда как на северных станциях (ст. 7021 и 7023), напротив, наблюдался пик обилия и под слоем скачка солености.

Над склоном западного отрога желоба Св. Анны наблюдалась иная картина вертикального распределения обилия бактериопланктона: максимальные величины также были приурочены к верхнему слою воды над галоклином (727– 1206 тыс. кл/мл, 35.7–60.2 мгС/м³), однако относительно высокие показатели обилия прокариот (712–784 тыс. кл/мл, 32.6–40.5 мгС/м³) были отмечены и на глубинах 100–150 м.

Величина продукции бактериопланктона в поверхностном слое воды на разрезе вдоль кромки льда снижалась в северо-восточном направлении с 28.5 до 0.21 мгС/м³ в сутки (рис. 3). Та же тенденция наблюдалась и для величины выедания бактериопланктона потребителями, которая снижалась с 9.6 мгС/м³ в сутки до нулевых значений. Над склоном западного отрога желоба Св. Анны разница в величине продукции бактериопланктона в поверхностном слое станций над склоном и на внешнем краю шельфа составляла почти четыре раза (18.2 и 4.7 мгС/м³ в сутки на станциях 7026 и 7043 соответственно), более чем на порядок различался и вклад потребителей бактериопланктона. В слое пика флуоресценции на большинстве станций значения удельного роста бактериопланктона либо оставались неизменными, либо увеличивались по сравнению с наблюдаемыми в поверхностном слое. Исключение составила станция 7015, на которой величина удельного роста снижалась с 0.78 до 0.28 сут⁻¹. В отличие от других точек, где проводились измерения продукции, на этой станции максимальные концентрации хлорофилла были приурочены к горизонту 2 м, тогда как другие станции отбора характеризовались либо наличием подповерхностного максимума хлорофилла, либо близкими величинами концентрации хлорофилла в поверхностном слое и на горизонте у границы верхнего перемешанного слоя [1].

Несмотря на то, что максимальные величины удельного роста бактериопланктона на большинстве станций были приурочены к пикам концентрации хлорофилла, при рассмотрении интегральных величин количественных характеристик прокариот не наблюдалось корреляции ни с концентрацией хлорофилла, ни с величиной первичной продукции. Также не было отмечено закономерностей широтного изменения обилия



Рис. 2. Распределение численности (а) и биомассы (б) бактериопланктона на разрезе вдоль ледовой кромки и вдоль склона желоба Св.Анны (в) и (г) соответственно. Июнь 2021 г.

бактериопланктона или его зависимости от сроков схода ледового покрова. Согласно множественной регрессионной модели, распределение численности и биомассы гетеротрофных прокариот на рассматриваемых разрезах в значительной степени ($R^2_{adi} = 0.59$ и 0.58 соответственно) объяснялось температурой и насыщением воды кислородом. Величины обилия в более теплой и богатой растворенным кислородом воде были выше. При анализе распределения обилия бактериопланктона на станциях, где лед сошел не позже недели до момента отбора проб, определяющими факторами являлись насыщение воды кислородом и концентрация нитратов, при росте которой концентрация гетеротрофных прокариот имела тенденцию к снижению ($R^2_{adi} = 0.67$ и 0.65 для численности и биомассы соответственно).

В июле–августе 2016 г. на разрезе вдоль Новой Земли средние для столба воды величины обилия бактериопланктона варьировали от 169 до 443 тыс. кл/мл (8–21 мгС/м³, рис. 4а, б). На станциях 5304_2, 5394 и 5392 максимумы численности бактериопланктона по вертикали были приурочены к слою пика флуоресценции, превышая значения обилия в поверхностном слое в 1.4–2.8 раза. На остальных станциях наблюдалось снижение концентрации прокариот с глубиной.

На разрезе над западным склоном желоба Св. Анны средние для столба воды величины обилия бактериопланктона изменялись от 247 до 517 тыс. кл/мл (12–28 мгС/м³, рис. 4в, г). При этом минимальные величины концентрации прокариот на разных горизонтах (216–282 тыс. кл/мл,

302



Рис. 3. Продукция бактериопланктона в поверхностном слое. Июнь 2021 г.

10.9—14.24 мгС/м³) были приурочены к краю шельфа, тогда как над склоном желоба значения обилия бактериопланктона на разных горизонтах изменялись от 214 до 632 тыс. кл/мл (10.8—33.2 мгС/м³). Вертикальное распределение численности и биомассы бактериопланктона на большинстве станций было равномерным по всей глубине, и только на станциях 5372 и 5354_2 снижалось в 1.5—2.5 раза на глубинах более 80 м.

Вклад прикрепленных клеток в общее обилие бактериопланктона на большинстве станций не превышал 20%, исключение составила только южная станция разреза вдоль Новой Земли (ст. 5403), где среднее значение этого показателя для столба воды составляло 28% общей численности (рис. 5). Большая часть прикрепленных клеток была ассоциирована с детритными частицами. Станции над склоном желоба Св. Анны характеризовались относительно высокой долей аггрегатов среди прикрепленных клеток (18-50%, рис. 5). На разрезе вдоль Новой Земли этот показатель не превышал 15%, а доля клеток, прикрепленных к минеральным частицам, возрастала с увеличением глубины.

Удельная продукция бактериопланктона варьировала от 0 до 1.28 сут⁻¹. На разрезе вдоль склона желоба Св. Анны максимальные значения удельной продукции были приурочены к слою над галоклином (0.44-1.28 сут⁻¹). Величина продукции на этих горизонтах составляла от 11.7 до 30.9 мгС/м³ в сутки. На станциях, расположенных на разрезе вдоль Новой Земли, относительно высокие величины удельной продукции бактериопланктона по вертикали наблюдались в верхнем прогретом слое воды. где при температуре выше 2°С этот показатель составлял 0.26-0.93 сут-1. Также на всех станциях, кроме 5392, наблюдался пик активности бактериопланктона в придонном слое, удельная продукция в нем составляла 0.76-0.81 сут⁻¹. Величины продукции в верхнем слое теплой воды варьировали от 9.2 до 23.1 мгС/м³ в сутки, тогда как в придонном горизонте станций с активным ростом бактериопланктона они составляли 8.4-9.4 мгС/м³ в сутки.

В середине лета 2016 г., как и в начале сезона 2021 г., не наблюдалось зависимости интегральных характеристик обилия прокариот от географического положения станций, первичной продукции или концентрации хлорофилла. Связи



Рис. 4. Распределение численности (а) и биомассы (б) бактериопланктона на разрезе вдоль Новой Земли и вдоль склона желоба Св.Анны (в) и (г) соответственно. Август 2016 г.

с распределением хлорофилла не наблюдалось и при рассмотрении вертикального распределения в фотическом слое. Согласно множественной регрессионной модели, распределение обилия гетеротрофных прокариот, как и в июне 2021 г., было положительно связано с температурой воды и насыщением ее кислородом, но еще одним фактором была концентрация фосфатов в воде ($R^2_{adj} = 0.58$ и 0.59 для численности и биомассы соответственно).

ОБСУЖДЕНИЕ

Оба года наблюдений характеризуются мало выраженным влиянием речного стока в районе работ. Это отражено и в отсутствии влияния солености, как маркера речных вод, на анализируемые параметры. Незначительное распреснение поверхностного слоя, по всей видимости, было вызвано таянием сезонного льда [7].

Средние величины обилия бактериопланктона снижались в середине лета по сравнению с началом сезона вскоре после схода сезонного льда. Менялась и картина вертикального распределения как концентрации прокариот, так и их активности. На разрезе вдоль Новой Земли обилие бактериопланктона в начале сезона снижалось по вертикали, а продукция прокариот в поверхностном слое, равно как и выедание его потребителями, уменьшалось в северо-восточном направлении. Подобная картина изменялась в середине лета, когда в вертикальном распределении

304



Рис. 5. Доля прикрепленных клеток от общей численности бактериопланктона. Август 2016 г.

обилия мог возникнуть второй пик в области подповерхностного максимума хлорофилла. В то же время в изменении величин продукции поверхностного слоя не наблюдалось выраженных закономерностей.

На разрезе вдоль склона желоба Св. Анны также наблюдались выраженные различия между ситуацией начала и середины летнего сезона. Средние величины обилия бактериопланктона также были ниже в июле-августе. Различия коснулись и вертикального распределения бактериопланктона: если в июне 2021 г. наблюдалось два пика обилия, то на большинстве станций в середине лета 2016 г. концентрация прокариот была относительно равномерна по вертикали, с минимальными величинами над краем шельфа. Стоит отметить, что распределение растворенного органического углерода на этом разрезе имело обратную картину: максимальные величины, равномерно распределененные по вертикали, наблюдались как раз над шельфом, резко снижаясь над склоном желоба [7], что может свидетельствовать о малой фракции легкодоступного для усвоения органического вещества в пуле органического углерода.

Если принять во внимание данные осенних наблюдений [4], то можно предположить дальнейшее развитие картины вертикального распределения в области склона желоба Св. Анны. В оба

асти склона желова Св. Анны. в ова – о

периода осенних наблюдений (2007 и 2011 гг.) наибольшие величины обилия сохранялись в верхнем перемешанном слое, а значения над шельфом возрастали за счет распространения речного стока. При этом значения удельной продукции были чуть более высокими на глубинах ниже верхнего перемешанного слоя (0.32–0.39 сут⁻¹ по сравнению с 0–0.3 сут⁻¹). Максимальная величина этого параметра (1.16 сут⁻¹) была приурочена к поверхностному распресненному слою над шельфом [4], тогда как в период отсутствия влияния стока в оба периода наших наблюдений как раз над шельфом наблюдались минимальные значения удельной продукции (0.13 и 0.09 сут⁻¹ в июне и августе соответственно).

Имеющиеся данные для шельфа западной части Карского моря были получены также в осенний период и относятся к срединному шельфу у п-ова Ямал [4]. В период наблюдений этот район тоже не испытывал выраженного влияния речного стока. Значения обилия были существенно ниже наблюдавшихся нами, а вертикальное распределение обилия было сходно с описанным для разреза вдоль Новой Земли в середине лета: максимальные величины в верхнем перемешанном слое с глубиной снижались более чем в 4 раза.

Отдельно стоит отметить изменение характера распределения прикрепленных клеток бактериопланктона: на разрезе вдоль Новой Земли, где обилие бактериопланктона снижается по вертикали, с глубиной возрастает доля прикрепленных ко взвеси клеток. В то же время в области склона желоба Св. Анны, где наблюдалось равномерное по вертикали распределение обилия бактериопланктона, такой закономерности не наблюдалось, напротив, для этих станций был характерен больший вклад аггрегированных клеток прокариот. Скорее всего, анализ источников органического вещества, используемого бактериопланктоном на глубинах ниже фотической зоны, поможет понять закономерности распределения прикрепленных форм прокариот.

Несмотря на некоторые совпадения в распределении концентрации хлорофилла [1, 10] и обилия бактериопланктона, корреляций между этими показателями не наблюлалось. Тем не менее одним из факторов, взаимосвязанных с численностью и биомассой прокариот, являлось насыщение воды кислородом. Так как с ростом величины насышения увеличивается и обилие бактериопланктона, можно предположить, что данная взаимосвязь обусловлена не активностью деструкции органического вещества, а концентрацией кислорода, как маркером прошедшего "цветения" фитопланктона [7]. Таким образом, связь этих параметров может рассматриваться как отражение временного лага между развитием фито- и бактериопланктона. Проявление положительной связи между концентрацией фосфатов и количественными характеристиками бактериопланктона в середине лета может отражать лимитирование прокариот по этому элементу на фоне относительно низкой активности первичных продуцентов. Как показано ранее [8], концентрация фосфатов может определять состав сообществ бактериопланктона в морских местообитаниях, при этом эффективность ассимиляции фосфатов клетками бактерий выше, чем у фитопланктона [9].

Таким образом, можно заключить, что в ходе сезонного развития бактериопланктона в западной части Карского моря изменяются не только его количественные характеристики. постепенно снижающиеся после активного весеннего развития, но и картина его вертикального распределения. Это по всей видимости связано как с прогревом воды, так и с использованием новосинтезированного органического вещества и перераспределением его на плотностных границах. При этом прямой связи с распределением фитопланктона не наблюдается, предположительно из-за временного лага между развитием фитои бактериопланктона. Данные наблюдений начала и середины лета позволяют заключить, что, в отличие от исследований конца вегетационного сезона [4], картина структурных изменений бактериопланктона не может быть основана только

на данных по обилию и активности прокариот верхнего перемешанного слоя.

Благодарности. Авторы благодарят начальника отряда гидрохимии Полухина А.А. за предоставленные детальные данные по распределению биогенных элементов для использования в работе.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания FMWE-2023-0002 (обработка материала), при поддержке проекта РФФИ № 20-35-90057 (статистический анализ данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Демидов А.Б., Сергеева В.М., Гагарин В.И. и др. Первичная продукция и хлорофилл размерных групп фитопланктона Карского моря в период схода сезонного льда // Океанология. 2022. Т. 62. № 3. С. 403–415.
- Москвина М.И., Мошарова И.В., Ильинский В.В., Комарова Т.И. Исследования бактериопланктона Байдарацкой губы (Карское море) в составе инженерно-экологических изысканий 2005 и 2007 годов // Охрана окружающей среды и здоровья человека в Российской Федерации и странах Евросоюза: сборник материалов международной научно-практической конференции. Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2014. С. 82–88.
- 3. *Романова Н.Д., Сажин А.Ф.* Взаимосвязь между объемом бактериальных клеток и содержанием в них углерода // Океанология. 2010. Т. 50. № 4. С. 556–565.
- 4. *Романова Н.Д., Сажин А.Ф.* Бактериопланктон шельфовой части Карского моря. Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 949–954.
- 5. *Романова Н.Д., Болтенкова М.А.* Сезонная изменчивость бактериопланктона эстуария р. Енисей // Океанология. 2020. Т. 60. № 1. С. 87–96.
- Романова Н.Д., Болтенкова М.А., Полухин А.А. и др. Гетеротрофный бактериопланктон эстуария оби в вегетационный сезон: пространственная и временная изменчивость // Океанология. 2022. Т. 62. № 3. С. 428–438.
- Флинт М.В., Анисимов И.М., Арашкевич Е.Г. и др. Экосистемы Карского моря и моря Лаптевых: Экспедиционные исследования 2016 и 2018 гг. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. М.: Ерхова И.М., 2021. 368 с.
- Chen Y., Ma G., Wu C. et al. Bacterial communities exhibit apparent phosphate concentration-related patterns of community composition, alpha diversity, and phylogenetic structure in the subtropical Daya Bay // Frontiers in Marine Science. 2023. V. 9. P. 1065973.
- *Currie D.J., Kalff J.* The relative importance of bacterioplankton and phytoplankton in phosphorus uptake in freshwater // Limnology and Oceanography. 1984. V. 29. P. 311–321.

- 10. *Demidov A.B., Gagarin V.I., Vorobieva O.V. et al.* Spatial and vertical variability of primary production in the Kara Sea in July and August 2016: the influence of the river plume and subsurface chlorophyll maxima // Polar Biology. 2018. V. 41. P. 563–578.
- Fenchel T. The microbial loop 25 years later // J. of Experimental Marine Biology and Ecology. 2008. V. 366. № 1. P. 99–103.
- Kamiya E., Izumiyama S., Nishimura M. et al. Effects of fixation and storage on flow cytometric analysis of marine bacteria // J. Oceanology. 2007. V. 63. P. 101–112.
- 13. *Porter K.G., Feig Y.S.* The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora // Limnology and oceanography. 1980. V. 25. № 5. P. 943–948.

- 14. *Pree B., Kuhlisch C., Pohnert G. et al.* A simple adjustment to test reliability of bacterivory rates derived from the dilution method // Limnology and Oceanography: Methods. 2016. V. 14. № 2. P. 114–123.
- Sherr B.F., Sherr E.B., Andrew T.L. et al. Trophic interactions between heterotrophic protozoa and bacterioplankton in estuarine water analyzed with selective metabolic inhibitors // Marine Ecology Progress Series. 1986. V. 32. P. 169–179.
- Weisse T. The microbial loop in the Red Sea: dynamics of pelagic bacteria and heterotrophic nanoflagellates // Marine Ecology Progress Series. 1989. V. 55. P. 241–250.

BACTERIOPLANKTON OF THE WESTERN PART OF THE KARA SEA

N. D. Romanova^{*a*, #}, M. A. Boltenkova^{*b*}, and E. M. Bezzubova^{*a*}

^a Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ^b Murmansk Marine Biological Institute, Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia [#]e-mail: NdRomanova@gmail.com

Data on the structural and production characteristics of bacterioplankton in the western part of the Kara Sea at the beginning and in the middle of summer are presented. In the region of the St. Anna Trough slope, the average abundance of prokaryotes for the water column was $(594-708) \times 10^3$ cells/ml $(26.4-36.5 \text{ mgC/m}^3)$ in June and $(247-517) \times 10^3$ cells/ml $(12-28 \text{ mgC/m}^3)$ at the beginning of August. On the transect along Novaya Zemlya, the average abundance of bacterioplankton in the water column was $(186-554) \times 10^3$ cells/mL $(8.5-30 \text{ mgC/m}^3)$ within a week after the seasonal ice and $(169-443) \times 10^3$ cells/mL $(8-21 \text{ mgC/m}^3)$ in the midsummer. Bacterial specific growth rate did not exceed 1.28 day^{-1} ; its high values were observed in the upper warm water layer, above the halocline, and also at the near-bottom depths. At the beginning of summer, the production of bacterioplankton tended to decrease in the northeast direction. The distribution of prokaryotes abundance was determined by temperature and water saturation with oxygen, possibly as an indirect indicator of past phytoplankton "bloom".

Keywords: bacterioplankton, Arctic microplankton, seasonal changes

— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ —

УДК 57.017.7

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ДЫХАНИЯ АРКТИЧЕСКИХ КОПЕПОД ОТ ВЕСА ТЕЛА ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

© 2024 г. Е. Г. Арашкевич^{1,*}, А. В. Дриц¹, А. Ф. Пастернак¹, С. Э. Френкель², В. А. Карманов¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия ² Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия

> *e-mail: aelena@ocean.ru Поступила в редакцию 09.06.2023 г. После доработки 17.06.2023 г. Принята к публикации 18.07.2023 г.

Скорость дыхания (*R*) в зависимости от веса животных (*W*) описывается уравнением $R = a W^b$, где *b* обычно принимается равным ³/₄. Однако ряд авторов указывает, что величина степенного коэффициента может варьировать при изменении температуры и в течение онтогенеза. Копеподы арктических морей большую часть жизни проводят при температуре $\leq 0^\circ$ С, однако соответствующих измерений скорости их дыхания крайне мало, что не позволяет оценить величину *b* при отрицательной температуре. Такие измерения проводились в рейсах НИС "Академик Мстислав Келдыш" в сибирских морях в 2018–2020 гг. Копепод адаптировали к экспериментальной температуре и помещали в герметичные склянки на 24 ч. Концентрацию кислорода измеряли оптоволоконным кислородным зондом. Приводятся результаты 120 измерений скорости дыхания и 111 измерений углерода тела у пяти видов копепод при температуре –1.5°С. Полученная зависимость углерода (*W*) от длины просомы (*L*) описывается уравнением $W = 6.982 L^{3.221}$, а зависимость дыхания от веса тела — уравнением $R = 0.077 W^{0.753}$. Не обнаружено влияния отрицательной температуры на степенной коэффициент *b*. Зависимость скорости дыхания от веса тела не изменялась в процессе онтогенеза *Calanus glacialis*.

Ключевые слова: Арктический зоопланктон, дыхание, содержание углерода в теле, температура, *Calanus glacialis*

DOI: 10.31857/S0030157424020079 EDN: RVKMIO

ВВЕДЕНИЕ

Дыхание — одна из важнейших физиологических функций организма, необходимая для обеспечения всех процессов жизнедеятельности. Скорость дыхания (R) связана с весом животных (W) уравнением: $R = a W^b$, где a — эмпирический коэффициент, численно равный R при W = 1; b степенной коэффициент, определяющий наклон данной зависимости. Величина степенного коэффициента (b) вызывает многочисленные дебаты исследователей. В начале прошлого века Руднером был предложен коэффициент ½ на основании того, что отношение объема к поверхности тела имеет такую же степень, и в течение долгого времени экспериментальные данные подтверждали эту закономерность (см. обзор [13]).

В 1960 г. на основании сравнения скорости метаболизма у разных видов в широком размерном диапазоне А. Хеммингсен установил [28], что степенной коэффициент равен примерно ³/₄

как у экзотермических, так и у эндотермических животных. Теоретическое обоснование аллометрической зависимости со степенным коэффициентом ¾ было дано авторами Метаболической теории экологии (the Metabolic Theory of Ecology), принявших "степенной закон ¾" как универсальный для широкого ранга организмов от бактерий до слонов и как предиктор большинства биологических процессов от молекулярного уровня до экосистемного [14, 24, 42]. Универсальность степенного закона ³4 была неоднозначно принята другими авторами, многие из которых подвергли ее суровой критике [напр., 7, 16, 20, 26, 36]. Хотя большинство экспериментальных результатов, по крайней мере, для многоклеточных организмов, согласуется с аллометрической зависимостью ¾ [19, 38], есть и многочисленные исключения, где степенной коэффициент, b, варьирует от ⅔ до 1 и выше (см. обзоры [25, 26]).

Для зависимости скорости дыхания от веса тела у водных ракообразных, в большинстве случаев наблюдается согласованность в отношении величины степенного коэффициента, который равен или близок к ³/₄ как у морских, так и у пресноводных животных [2, 4, 8, 31].

Однако есть указания на то, что величина степенного коэффициента зависимости R(W) у копепод может варьировать при изменении температуры [17, 33], а также в течение онтогенеза, снижаясь по мере взросления животного [22].

В арктических морях большую часть жизни копеподы проводят при отрицательной или близкой к нулю температуре [18]. Однако измерения скорости дыхания арктических копепод при температуре $\leq 0^{\circ}$ С крайне немногочисленны [11, 12, 27, 29, 32, 39], а общая межвидовая зависимость *R*(*W*) при отрицательной температуре не выявлена.

В Карском море и море Лаптевых доминируют три вида копепод рода *Calanus* (*C. glacialis, C. hyperboreus* и *C. finmarchicus*) а также *Metridia longa* и *Oithona similis* [1, 21, 30, 34, 35, 37]. Их доля в суммарной биомассе зоопланктона составляет до 80–85%.

Целью данной работы было выявление общей зависимости скорости дыхания от веса тела ($R = a W^b$) массовых видов копепод морей Сибирской Арктики при отрицательной температуре (-1.5° C).

Были поставлены следующие задачи:

- 1) измерение скорости дыхания массовых видов копепод;
- 2) сравнение параметров зависимости *R*(*W*) у копепод при отрицательной температуре и полу-

ченных другими авторами при положительных значениях температуры;

3) сопоставление зависимости *R*(*W*) на межвидовом уровне и на внутривидовом уровне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работы проводились в трех рейсах НИС "Академик Мстислав Келдыш" в сибирских арктических морях в 2018—2020 гг. Районы отбора проб для экспериментов по дыханию находились в северной части моря Лаптевых в сентябре 2018 г., в западной части Карского моря у кромки льда в июле 2019 г. и в открытых водах западной части Карского моря в сентябре 2020 г. (табл. 1).

Зоопланктон для экспериментов собирали сетью Джеди (площадь входного отверстия 0.1 м², размер ячеи 180 мкм) из слоя 50–20(10) м, то есть ниже термоклина, определенного предварительным CTD-зондированием. По нашим наблюдениям концентрация зоопланктона в этом слое была максимальной. Сеть была оборудована стаканом с нефильтрующими стенками, чтобы свести к минимуму повреждение животных.

Сразу после взятия пробу переливали в 2-х литровый стакан с фильтрованной холодной водой, установленный на льду, и неповрежденные экземпляры копепод сортировали по видам/стадиям под стереомикроскопом с холодным освещением. Для отлова и пересадки животных использовали широкие стеклянные пипетки.

Дата	Номер станции	Местное время	GMT	Широта, N	Долгота, Е	Глубина, м
		Море	е Лаптевых, 2	018 г.		
23.08.2018	5944	21:15	14:15	77°59.8'	105º19.6'	207
27.08.2018	5952	15:45	07:45	77°10.9'	125°48.9'	789
29.08.2018	5957	18:55	10:55	78°30.0'	125°48.0'	2787
03.09.2018	5968	18:40	10:40	78°05.0'	112°34.0'	348
		Kap	ское море, 20)19 г.		
08.07.2019	6223	7:30	3:30	74°52.52'	62°50.26'	375
09.07.2019	6226	10:00	05:00	75°44.71'	68°18.29'	312
12.07.2019	6229/2	02:30	21:30	75°44.53'	72°01.96'	167
18.07.2019	6226/2	14:30	09:30	75°44.53'	68°17.82'	306
21.07.2019	6222/2	8:45	4:45	73°06.21'	61°18.22'	90
31.07.2019	6223/2	23:30	19:30	74°52.52'	62°49.84'	370
		Kap	ское море, 20	20 г.		
01.09.2020	6877	04:56	00:56	73°06.13'	61°18.89'	98
04.09.2020	6886	09:27	04:27	76°45.98'	70°52.53'	401
11.09.2020	6913	09:24	05:24	74°46.87'	62°21.60'	377
12.09.2020	6877/2	01:59	21:59	73°06.06'	61°20.30'	97

Таблица 1. Дата, время и координаты станций

Близко родственные виды копепод *Calanus* glacialis и *Calanus finmarchicus* были разделены на основании длины просомы в соответствии с [40].

Разобранных по видам и возрастным стадиям копепод помешали в стаканы с фильтрованной морской водой и помещали в терморегулируемые инкубаторы (ТВЛ-К50, Россия) для акклиматизации к экспериментальной температуре -1.5°С. Воду для опытов брали батометрами Нискина с глубины 30-50 м, фильтровали через стекловолокнистые фильтры GF/F и помещали в термостат при той же температуре. После 1-2-дневной акклиматизании копепол еще раз проверяли пол стереомикроскопом, промывали в охлажденной до -1.5°C фильтрованной воде, пересаживали в экспериментальные склянки объемом 24.5 мл и инкубировали в течение 20-28 ч при температуре -1.5°C. Все процедуры с животными проводились на льду.

Для каждого вида/стадии делали от трех до шести повторностей и три контроля (склянки без животных). Количество животных в каждой склянке зависело от их размера/массы: от двух самок *Calanus hyperboreus* до 200 особей *Oithona similis*. В ходе экспериментов концентрация кислорода уменьшалась менее чем на 30% от исходной.

Перед экспериментами сенсорные споты PSt3 были прикреплены силикатным клеем к внутренней стенке склянок и концентрацию кислорода измеряли оптоволоконным кислородным зондом (Fibox 4 PreSens Precision sensing GmbH Регенсбург). Концентрацию кислорода измеряли в мг $O_2 \pi^{-1}$ и затем переводили в мл $O_2 \pi^{-1}$ с использованием коэффициента пе-



Рис. 1. Пример изменения концентрации кислорода со временем в опытах с *Calanus hyperboreus* CV и CIV и в трех контрольных склянках (среднее \pm SD).

ресчета 1 мг $O_2 = 0.7$ мл O_2 . Калибровка датчиков проведена при 0% и 100% насыщении кислородом дистиллированной воды, как описано в [41].

В течение эксперимента концентрацию кислорода в опытных и контрольных склянках регистрировали от четырех до шести раз. Как показали пилотные эксперименты, непропорционально сильное снижение концентрации кислорода в склянках с животными происходит в первые 1-2 часа, что, возможно, объясняется их стрессом после пересадки. Поэтому первые измерения концентрации кислорода начинали через два часа после начала эксперимента. чтобы дать возможность животным адаптироваться к новым условиям. В оценку потребления кислорода был включен отрезок времени, когда снижение концентрации было линейным (рис. 1). В большинстве контрольных опытов без животных концентрация кислорода в течение эксперимента варьировала в пределах 1 - 1.5%.

Отрезок времени, для которого производился расчет скорости потребления кислорода копеподами, указан линией внизу графика.

После окончания эксперимента состояние животных проверяли под стереомикроскопом и помещали в лоток из алюминиевой фольги (0.5 см³) для измерения массы углерода. Измерения проводились с помощью анализатора общего органического углерода Shimadzu TOC-VCPH. В некоторых случаях для измерения содержания органического углерода копепод собирали из того же слоя, что и для опытов по дыханию (см. ниже табл. 2).

Скорость дыхания (R, мкл O₂ экз⁻¹ сут⁻¹) рассчитывали по формуле:

$$R = \frac{(B_1 - B_2) \times V \times 24}{t \times N};$$

где B_1 и B_2 — начальная и конечная концентрации кислорода (мл O₂ π^{-1}), V — объем экспериментального флакона (мл), t — продолжительность эксперимента (ч), N — число животных.

Зависимость между скоростью дыхания и массой тела в единицах органического углерода (*W*, мкг С экз⁻¹) описывали экспоненциальным уравнением:

$$R = R_0 \times W^b$$

где R_0 — эмпирический коэффициент, выраженный в тех же единицах, что R; b —показатель степени, соотносящий скорость дыхания с массой тела (W).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Характеристика района исследования. Детальное описание гидрофизических особенностей районов работ приведено в [5, 6].

В августе-сентябре 2018 г. в море Лаптевых температура и соленость верхнего перемешанного слоя (ВПС, толщина слоя 15–21 м) составляла 1.3–3.7°С и 29–31.8 рѕи. Ниже слоя скачка и до глубины 100 м температура была – 1.8...–1.5°С, а соленость 33.8–34.3. Концентрация хлорофилла в 50-м слое варьировала в пределах 0.15–0.7 мг Chl м⁻³.

В июле 2019 г. работы проводились у ледовой кромки вдоль архипелага Новая земля (Карское море). Температура и соленость ВПС изменялась от 0.3 до 5°С и от 31 до 32.5 рѕи соответственно. Толщина ВПС менялась от 5 до 15 м, увеличиваясь по мере прогрева воды. Ниже температура варьировала в диапазоне 0... -1.7°С, при солености 33.8–34.3 рѕи. Распределение хлорофилла характеризовалось образованием глубинных (от 20 до 50 м) максимумов с концентрацией в них 2–5 мг/м³.

В сентябре 2020 г. в западной части Карского моря температура ВПС менялась от 8.2 до 5.5° С, а соленость от 32.6 до 34.3 рѕи. На глубине около 20 м располагался выраженный термоклин, ниже которого температура варьировала от -0.5 до -1.5° С. Концентрация хлорофилла в верхнем 50-м слое не превышала 0.2-0.4 мг/м³.

Содержание органического углерода в теле копепод. Содержание углерода у одного и того же вида/стадии менялось в зависимости от района и сезона исследований (табл. 2). Так, например, содержание углерода в теле *Calanus glacialis* CV возрастало от 144–202 мкг С/экз осенью 2018 г. (море Лаптевых) до 304–686 мкг С/экз в июле 2019 г. (Карское море). У *Calanus hyperboreus* CV осенью 2018 и летом 2019 (Карское море) содержание углерода было примерно равным (824 и 894 мкг С/экз) и возрастало до 2322 мкг С/экз в сентябре 2020 г. (Карское море).

Зависимость содержания углерода (C, мкг/экз) от длины просомы (L, мм) была описана уравнением:

$$C = a \times L^b$$
,

где a — эмпирический коэффициент; b — показатель степени, соотносящий количество углерода в теле рачков с их длиной. В таблице 3 приведены параметры уравнений C(L) для разных групп копепод. Группа C. glacialis (Calanus glacialis) представлена возрастными стадиями от науплиусов до самок. В группу "Другие виды" включены старшие возрастные стадии (CIV — CVI) копепод Calanus hyperboreus, C. finmarchicus, Metridia longa и Oithona similis.

Тест Чоу (Chow) [15], проведенный между зависимостями C(L) для C. glacialis и другими видами, показал, что статистическое различие между этими двумя зависимостями (внутривидовой и межвидовой) отсутствует: $F = 2.744 < F_{crit.} = 3.081$. Таким образом, целесообразнее использовать единую модель регрессии для всех видов (рис. 2).

Скорость дыхания копепод в зависимости от веса тела. Из 120 измерений скорости дыхания у арктических копепод при температуре –1.5°С 73 измерения были проведены для *Calanus glacialis* (все копеподитные стадии и старшие науплии), 20 измерений для *C. hyperboreus* (CIV-CVI),



Рис. 2. Содержание углерода (*C*) в теле копепод в зависимости от длины просомы (*L*). Параметры и статистика регрессии даны в табл. 3.

АРАШКЕВИЧ и др.

Станция	Дата	Вид/стадия	<i>С</i> , мкг/экз	п
		Море Лаптевых. Август-сентяб	рь 2018 г.	I
5944	23.08.18	Metridia longa, fem	144.83 ± 14.58	3
5944	23.08.18	M. longa, CV	38.58 ± 12.89	3
5952	27.08.18	Calanus glacialis, fem	499.93 ± 8.95	3
5952	27.08.18	C. glacialis, CV	202.33 ± 13.43	3
5952	27.08.18	C. hyperboreus, fem	1875.0	1
5952	27.08.18	C. hyperboreus, CV	824.2 ± 65.8	3
5957	29.08.18	C. hyperboreus, fem	1514.67 ± 189.48	3
5957	29.08.18	C. glacialis, CV	178.13 ± 9.15	3
5968	03.09.18	C. glacialis, CV	144.13 ± 23.42	3
		Карское море. Июль 2019	Г.	
6223	08.07.19	C. hyperboreus, CV	895.2 ± 246.7	3
6223	08.07.19	C. hyperboreus, CIV	263.73 ± 72.15	7
6226	09.07.19	C. finmarchicus, fem	105.08 ± 34.53	4
6226	09.07.19	C. finmarchicus, CV	119.13 ± 10.12	4
2229/2	12.07.19	C. glacialis, CV	303.77 ± 63.36	3
2229/2	12.07.19	C. glacialis, CIV	132.28 ± 5.44	4
2229/2	12.07.19	C. glacialis, CIII	19.62 ± 5.44	4
2229/2	12.07.19	C. glacialis, CII	6.09 ± 1.39	4
2229/2	12.07.19	Oithona similis, CV-fem	1.15 ± 0.06	4
6226/2	18.07.19	C. glacialis, CV	632.08 ± 105.38	6
6226/2	18.07.19	C. glacialis, CII	10.51 ± 0.22	4
6226/2	18.07.19	C. glacialis, CI	3.55 ± 1.214	7
6226/2	18.07.19	C. glacialis, nauplii	2.05 ± 0.46	6
6222/2	21.07.19	C. glacialis, CIV	167.56 ± 37.69	3
6222/2	21.07.19	C. glacialis, CIII	59.80 ± 8.23	3
6223/2	31.07.19	C. glacialis, CIV	270.8 ± 35.65	3
		Карское море. Сентябрь 20	20 г.	
6877	01.09.20	C. glacialis, CV	324.65 ± 83.26	3
6877	01.09.20	C. glacialis, CV	477.17 ± 116.26	4
6877	01.09.20	C. glacialis, CV	318.41 ± 54.48	4
6877	01.09.20	C. glacialis, CV	268.51 ± 56.12	4
6886	04.09.20	<i>M. longa</i> , fem	153.34 ± 25.58	3
6886	04.09.20	M. longa, CV	79.77 ± 9.936	3
6913	11.09.20	C. hyperboreus, fem	3246.7 ± 1061.4	4
6913	11.09.20	C. hyperboreus, CV	2322.0 ± 477.5	3
6877/2	12.09.20	C. glacialis, CV	290.25 ± 32.12	4
6877/2	12.09.20	C. glacialis, CIV	105.25 ± 21.04	4

Таблица 2. Содержание органического углерода (*C*, мкг/экз) в теле копепод в разные сезоны исследований. Указаны средние значения ± стандартное отклонение, *n* — число измерений

12 - для C. finmarchicus (CV-CVI), <math>12 - для Metridia longa (CV-CVI) и 3 - для Oithona similis (CV-CVI). Вес, выраженный в единицах органического углерода (W), изменялся более чем на три порядка величин, от 1.15 мкг С/экз у Oithona similis до 1875 мкг С/экз у самок Calanus hyperboreus (рис. 3).

Межвидовая аллометрическая зависимость скорости дыхания от веса описывается уравнением $R = 0.077 \ W^{0.753}$.

Зависимость скорости дыхания от веса на внутривидовом (онтогенетическом) уровне, исследо-

312

ванная у разных возрастных стадий от науплиев до взрослых самок *Calanus glacialis*, описывается уравнением регрессии $R = 0.090 W^{0.726}$ (рис. 4). Вес копепод изменялся от 2.48 мкг С/экз до 768 мкг С/экз.

Детальная регрессионная статистика приведена в табл. 4. Перекрытие 95% доверительных интервалов для коэффициентов *a* и *b* для межвидовой и внутривидовой регрессий предполагает, что эти две зависимости различаются незначительно. Другими словами, для всех данных можно использовать единую модель регрессии (Тест Chow, $F = 2.806 < F_{crit.} = 3.076$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Содержание углерода в теле копепод. Полученные данные по содержанию органического углерода в теле арктических копепод из морей Карского и Лаптевых вполне укладываются в диапазон значений, известных для этих видов в других районах Арктики [10, 23, 32, 39]. Наиболее детально зависимость количества углерода от размера копепод C(L) в разные сезоны была исследована в западной части Арктического океана между 75° и 80° с.ш. [10] и в заливе Амундсена между 70° и 72° с.ш. [23]. В табл. 5 приведены параметры степенных уравнений C(L), рассчитан-

Таблица 3. Параметры зависимости содержания углерода (*C*) от длины просомы (*L*) копепод. (R^2 – коэффициент детерминации, *n* — число измерений, SE — стандартная ошибка, *CL* — 95% доверительный интервал. Уровень значимости для всех параметров *p* < 0.001.)

	10	D 2	Kc	эффициент а	Коэфф	ициент b
Вид	n	Λ	а	CL	$b \pm SE$	CL
C. glacialis	67	0.974	6.424	5.737-7.194	3.331 ± 0.067	3.197-3.465
Другие виды	44	0.979	8.653	7.307-10.247	3.019 ± 0.068	2.881-3.157
Все виды	111	0.978	6.982	6.361-7.663	3.221 ± 0.047	3.129-3.314

Таблица 4. Регрессионная статистика скорости дыхания от веса тела для всех копепод (межвидовая зависимость) и разных возрастных стадий *Calanus glacialis* (внутривидовая зависимость). (n – число измерений; R^2 – коэффициент детерминации; CL –доверительный интервал; SE — стандартная ошибка. Уровень значимости для всех параметров p < 0.001.)

Dorpooug	10	D 2	Коэ	ффициент <i>а</i>	Коэфф	ициент <i>b</i>
гегрессия	n	Λ	а	95% CL	$b \pm SE$	95% CL
Межвидовая	120	0.963	0.077	0.067 - 0.088	0.753 ± 0.014	0.727-0.780
Внутривидовая	73	0.960	0.090	0.076-0.107	0.726 ± 0.018	0.691-0.761



Рис. 3. Скорость дыхания массовых арктических копепод (R) в зависимости от веса тела (W) при температуре -1.5° С.

ных этими авторами для отдельных видов и полученных нами для пяти видов: *C. hyperboreus* (*CH*), *C. glacialis* (*CG*), *C. finmarchicus* (*CF*), *M. longa* (*ML*) и *O. similis* (*OS*).

Различие между значениями углеродного веса, рассчитанного для разных стадий C. hyperboreus (CII-CVI) по уравнению, полученному нами (табл. 5) и [23], составило 10-25%, а рассчитанного по уравнению [10] для копеподитных стадий СІІІ–СVІ было в два раза ниже наших. Сравнение было проведено только для тех стадий, веса которых были включены в уравнения [10, 23]. Значения веса для C. glacialis (CIII-CVI), рассчитанные по [23], отличались от наших на $\pm 10\%$, а рассчитанные по [10] для CIV-CVI — на 1-25%. Значения веса старших стадий *M. longa* (CIV-CVI), рассчитанные по [23] и нашему уравнению, практически не отличались: разница составляла 3-4%. Содержание углерода (1.15 ± 0.06 мкг С/экз, табл. 2) в теле O. similis (CV-CVI) вполне соответствует значениям для самок этого вида (1.30 ± 0.13) , приведенному в [10].

В целом, сравнение углеродных весов арктических видов из различных районов Арктики, рассчитанные с использованием приведенных в табл. 5 уравнений, не выявили существенных различий. За исключением старших стадий *C. hyperboreus* по данным [10], различия между весами не превышали 25%, что укладывается в 95% доверительный интервал для измерений такого типа. Низкие веса *C. hyperboreus* сами авторы объясняют большим количеством недавно перелинявших особей, не успевших накопить органическое вещество.

Отмеченное нами значительное увеличение содержания углерода в теле *C. glacialis* CV и *C. hyperboreus* CV в середине лета — начале осени хорошо согласуется с наблюдениями [24], согласно которым сезонный максимум углеродного веса у старших стадий этих видов приходится на июль.

Таблица 5. Параметры степенного уравнения $C = a L^b$ (C - углеродный вес, мкг С/экз; <math>L - длина просомы копепод, мм) для копепод в различных районах Арктики. Римскими цифрами обозначены сезоны: I — весна; II лето; III — осень; IV — зима. НД — наши данные

Виды	а	b	R^2	Район	Сезон	Источник
C. hyperboreus	7.258	3.074	0.734	Залив Амундсена	II, IV	[23]
C. glacialis	5.167	3.510	0.851	Залив Амундсена	I–II	[23]
M. longa	7.168	3.236	0.743	Залив Амундсена	I–III	[23]
C. hyperboreus	1.986	3.717	0.948	Западная Арктика	I–IV	[10]
C. glacialis	4.664	3.671	0.927	Западная Арктика	I–IV	[10]
CH, CG, CF, ML, OS	6.982	3.222	0.978	Сибирская Арктика	II–III	НД



Рис. 4. Скорость дыхания *Calanus glacialis* (R) в зависимости от веса тела (W) при температуре -1.5° С.

И, напротив, у *Metridia longa* не наблюдалось значительных сезонных изменений углеродного веса [23].

Арктические виды хорошо адаптированы к жизни в суровых условиях продолжительной зимы с отсутствием растительной пищи и короткого вегетационного периода. Виды рода *Calanus* включают в жизненный цикл стадию покоя (диапаузу). За короткий период цветения фитопланктона они должны накопить достаточное количество резервных веществ (главным образом в виде липидов), чтобы, опустившись на глубину, пережить зимний период отсутствия корма. Поэтому к концу вегетационного сезона содержание углерода в их теле максимально. Другая жизненная стратегия характерна для Metridia longa и Oithona similis. Эти виды активны в течение всего года, и в отсутствие растительной пищи находят альтернативные источники питания.

Скорость дыхания копепод в зависимости от веса тела при отрицательной температуре. Хотя арктические копеподы большую часть жизни проводят при температуре ниже нуля [18, 23], данные по скорости их дыхания при отрицательной температуре весьма малочисленны, и в основном касаются старших копеподитных стадий. В табл. 6 приведены литературные и собственные данные по дыханию арктических копепод при температуре $\leq 0^{\circ}$ С.

Как видно из таблицы 6, значения скорости дыхания копепод одного и того же вида и стадии в подавляющем числе случаев отличаются незначительно, несмотря на то что они получены с использованием различных методов и в различные сезоны.

Полученная нами аллометрическая зависимость скорости дыхания от содержания углерода в теле копепод для диапазона веса, составляющего три порядка, описана уравнением $R = 0.077 W^{0.753}$, то есть значение степени *b* соответствует так называемому "закону степени ³/₄" ("3/4-power law") [14, 24, 42]. Дебаты по поводу универсальности этого закона продолжаются в течение долгого времени, и вопрос о том, чему равно значение *b* (²/₃, ³/₄ или больше) остается до сих пор открытым [16, 20, 25, 26]. Величина степенного показателя *b* имеет принципиальное значение при расчетах энергетического баланса животных. Например, расчетная скорость метаболизма копепод весом 1000 мкг С/экз при *b* = 0.7 будет в два раза ниже, чем при *b* = 0.8.

Ряд исследователей указывали, что температура может значительно изменять значение этого коэффициента, причем у разных пойкилотермных организмов увеличение температуры может приводить как к уменьшению, так и к увеличению b [25, fig. 3]. Для морских ракообразных тенденция к уменьшению степенного показателя с увеличением температуры приведена в работе

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

[33]. В пределах температурного диапазона от 0 до 30°С значения *b* уменьшались от 0.79 до 0.63 [33]. Напротив, в работе [17] показано, что значение степенного показателя у морских копепод возрастает по мере роста температуры [17]. Это заключение было подтверждено экспериментами с *Artemia salina* при температуре 5 и 13°С. В первом случае регрессионный коэффициент был равен 0.67, а во втором равнялся 0.93 [17].

Большинство зависимостей скорости дыхания от веса тела для водных *Crustacea* было получено в диапазоне температуры от 10 до 30°С [2, 4, 8, 31], при этом степенной коэффициент *b* близок к значению ³/₄. Поскольку степенной коэффициент зависимости R(W) для арктических копепод при температуре -1.5°С также равен ³/₄, можно с уверенностью утверждать, что изменение температуры не влияет на величину степенного коэффициента этой группы животных.

Еще одним фактором, влияющим на величину степенного показателя зависимости R(W), ряд исследователей считают изменение типа метаболизма при онтогенезе [25]. В работе [22] приведены данные о значительном снижении степенного коэффициента у копеподитных стадий трех пресноводных копепод по сравнению с науплиальными стадиями. Например, коэффициент b зависимости дыхания от веса науплиусов Mesocyclops brasilianus равен 1.08, а для копеподитов того же вида 0.56 [22]. Эти результаты противоречат данным [9], полученным для науплиусов морских копепод Oithona davisae при температуре 20°С. Согласно этим данным, зависимость скорости лыхания от веса науплиусов соответствует "степенному закону ³/₄" [9, fig. 3*a*].

В нашей работе существование онтогенетической (внутривидовой) изменчивости степенного коэффициента было проверено на примере *Calanus glacialis*. Полученная зависимость R(W) для диапазона веса более двух порядков и включающая стадии развития от старших науплиусов до самок, имеет линейный характер, что предполагает отсутствие влияния онтогенетических изменений на регрессионный показатель.

Следует подчеркнуть, что для достоверного определения степенного показателя зависимости между весом и скоростью метаболизма необходимо выполнение ряда условий, главные из которых: широкий диапазон значений веса (более двух порядков величин), достаточное число экспериментальных данных (более 30) и точное определение веса экспериментальных животных [20, 25, 33]. В наших экспериментах все три условия были выполнены. Можно предположить, что в ряде случаев отклонение степенного коэффициента зависимости R(W) от значения 0.75 вызвано несоблюдением этих условий.

-иd	32].	
кспе	ы С	
€ ИС	= 0.5	
t∐ pž	ŇC	
long	U.	
ridia	вина	
Met	IOLLE	
Р. И	1 OTE	
ts sn	НИСМ	
alan	30Bal	
од С	IOILE	
пеп	C NCI	
⁻¹) K(Š	
ΗM	S D	
/r D	ой B6	
O E	cyx	
V) EE	3aH B	
ханл	0330F	
и ды	eo6p	
pocT	дп п	
ckol	х бы	
0Ш ()	HHB	
ΠH)	1Х Да	
HIЫX	Halli	
дан	H RIU	
HILIX	õ	
TBCH	Bec	
cobc	НЫЙ	
IX И (брод	
/pHb	VIJ	e)
срату	0°C.	ени
лите	pe ≤	ЮН
ние	рату	e OTF
abhe	ытте)OHT
Cpi	ой те	ндар
ща б	ЛЬНС	· crai
абли	fehta	– D
Таблица 6. Сравнение литературны	ментальной температуре ≤ 0°С. Угле	SD — стандартное отклонение

Вид	Стадия	Район работы / сезон	T, °C	MJI $O_2 \Gamma^{-1} DW \Psi^{-1}$	SD / диапазон	Источник
C. hyperboreus	Female	Пролив Фрама / август	0 ± 1	0.43	0.16	[11]
		Пролив Джонса / август	-	0.345*	0.023	[27]
		Северная Водная полынья / апрель	0	0.276	0.083 - 0.668	[39]
		Северная Водная полынья / май	0	0.251	0.144 - 0.444	[39]
		Пролив Фрама / июль	-0.8	0.300	0.092	[29]
		Море Лаптевых / август	-1.5	0.298	0.064	[HJ]
C. hyperboreus	CV	Пролив Фрама / август	0 ± 1	0.49	0.21	[11]
		Пролив Джонса / август		0.449*	0.021	[27]
		Пролив Фрама / июль	-0.5	0.308	0.038	[29]
		Баренцево море / май-июнь	-0.3	0.394	0.026	[32]
		Море Лаптевых / август	-1.5	0.433	0.074	[HJ]
		Карское море / июль	-1.5	0.319	0.062	[HJ]
C. glacialis	Female	Баренцево море/ май-июнь	-1.8	0.6	0.3 - 1.0	[12]
		Баренцево море/ май-июнь	-0.5	0.932	0.053	[32]
		Море Лаптевых / август	-1.5	0.372	0.028	[HJ]
C. glacialis	CV	Пролив Фрама / июль	0	0.329	0.075	[29]
		Баренцево море / май-июнь	-1.8	0.57	0.2 - 0.8	[12]
		Карское море / июль	-1.5	0.347	0.113	[HJ]
		Карское море / сентябрь	-1.5	0.321	0.088	[HJ]
		Море Лаптевых / август-сентябрь	-1.5	0.490	0.105	[H]
C. glacialis	CIV	Баренцево море / май-июнь	-1.8	0.73	0.5 - 1.1	[12]
		Карское море / июль	-1.5	0.410	0.133	[HJ]
		Карское море / сентябрь	-1.5	0.465	0.099	[HJ]
C. glacialis	CIII	Баренцево море / май-июнь	-1.8	0.95	0.7 - 1.5	[12]
		Карское море/июль	-1.5	0.762	0.304	[HJ]
C. finmarchicus	Female	Баренцево море / май-июнь	0	0.847	0.149	[32]
		Пролив Фрама / июль	0	0.454	0.150	[29]
		Карское море / июль	-1.5	0.746	0.095	[HJ]
M. longa	Female	Пролив Фрама / июль	-1.6	0.807	0.035	[29]
		Море Лаптевых / август	-1.5	0.488	0.024	[HД]
		Карское море / сентябрь	-1.5	0.419	0.059	[HД]
* Сухой вес взят из [11].						

АРАШКЕВИЧ и др.

№ 2 2024 ОКЕАНОЛОГИЯ том 64

выводы

Зависимость содержания углерода (мкг С/экз) от длины просомы (L) у пяти видов арктических копепод в диапазоне размеров от 0.55 мм (*Oithona similis*) до 6.9 мм (самки *Calanus hyperboreus*) описана уравнением $C = 6.98 L^{3.221}$, что хорошо согласуется с данными, полученными для отдельных видов из других районов Арктики.

Полученная нами аллометрическая зависимость скорости дыхания (R) от содержания углерода в теле копепод (W) в диапазоне веса, составляющего три порядка величин, описывается уравнением $R = 0.077 W^{0.753}$, то есть, значение степени b соответствует "степенному закону ³/₄" ("3/4-power law").

Сравнение наших результатов, полученных при температуре -1.5°C, с литературными данными, полученными при температуре выше 10°C, показало отсутствие влияния температуры на регрессионный коэффициент зависимости скорости дыхания от веса тела планктонных ракообразных.

Линейный характер регрессии R(W), полученной нами для разных возрастных стадий от науплиусов до самок *Calanus glacialis*, свидетельствует об отсутствии изменения параметров зависимости R(W) в течение онтогенеза.

Благодарности. Авторы благодарят экипаж НИС "Академик Мстислав Келдыш".

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FMWE-2021-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 4. *Арашкевич Е.Г., Дриц А.В., Пастернак А.Ф. и др.* Распределение и питание растительноядного зоопланктона в море Лаптевых // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 404–419.
- 5. Винберг Г.Г. Энергетический обмен как функция массы тела у водных пойкилотермных животных // Журн. общ. биол. 1976. Т. 37. № 1. С. 56–70.
- Лобус Н.В., Флинт М.В., Флёрова Е.А., Щеглова Я.В. Биохимический состав и содержание энергии в зоопланктоне Карского моря // Океанология. 2020. Т. 60. № 6. С. 889–899.
- 7. *Сущеня Л.М.* Интенсивность дыхания ракообразных. Киев: Наукова Думка, 1972. 195 с.
- Флинт М.В., Анисимов И.М., Арашкевич Е.Г. и др. Экосистемы Карского моря и моря Лаптевых. Материалы экспедиционных исследований 2016 и 2018 гг. М.: Издатель Ерохова И.М., 2021. 368 с.
- 9. Флинт М.В., Арашкевич Е.Г., Артемьев В.А. и др. Экосистемы морей Сибирской Арктики. Мате-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

риалы экспедиционных исследований 2015 и 2017 гг. М.: АПР, 2018. 232 с.

- 10. *Alcaraz M*. Marine zooplankton and the Metabolic Theory of Ecology: is it a predictive tool? // Journal of Plankton Research. 2016. V. 38. № 3. P. 762–770. https://doi.org/10.1093/plankt/fbw012
- Alekseeva T.A., Zotin A.I. Standard metabolism and macrotaxonomy of Crustaceans // Biology Bulletin. 2001. V. 28. P. 157–162. https://doi. org/10.1023/A:1009415032315
- 12. Almeda R., Alcaraz M., Calbet A., Saiz E. Metabolic rates and carbon budget of early developmental stages of the marine cyclopoid copepod Oithona davisae // Limnol. Oceanogr. 2011. V. 56. № 1. P. 403–414.
- Ashjian C.J., Campbell R.G., Welch H.E. et al. Annual cycle in abundance, distribution, and size in relation to hydrography of important copepod species in the western Arctic Ocean // Deep Sea Res. Part I. 2003. V. 50. P. 1235–1261. https://doi.org/10.1016/S0967-0637(03)00129-8.
- Auel H., Klages M., Werner I. Respiration and lipid content of the Arctic copepod Calanus hyperboreus overwintering 1 m above the seafloor at 2,300 m water depth in the Fram Strait // Mar. Biol. 2003. V. 143. P. 275–282.
- 15. *Båmstedt U., Tande K.S.* Respiration and excretion rates of Calanus glacialis in arctic waters of the Barents Sea // Mar. Biol. 1985. V. 87. P. 259–266.
- von Bertalanffy L. Quantitative Laws in Metabolism and Growth // Q. Rev. Biol. 1957. V. 32. № 3. P. 217–231. https://doi.org/10.1086/401873
- Brown J.H., Gillooly J.F., Allen A.P. et al. Toward a metabolic theory of ecology // Ecology. 2004. V. 85. P. 1771–1789.
- Chow G.C. Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions // Econometrica. 1960. V. 28. P. 591–605.
- Clarke A., Fraser K.P.P. Why does metabolism scale with temperature? // Funct. Ecol. 2004. V. 18. P. 243–251.
- Conover R.J. The feeding behaviour and respiration of some marine plank tonic Crustacea // Biol. Bull. Mar. Biol. Lab. Woods Hole. 1960. V. 119. № 3. P. 399–415.
- Darnis G., Fortier L. Temperature, food and the seasonal vertical migration of key arctic copepods in the thermally stratified Amundsen Gulf (Beaufort Sea, Arctic Ocean) // J. Plankton Res. 2014. P. 36. № 4. P. 1092–1108.

https://doi.org/10.1093/plankt/fbu035

- DeLong J.P., Okie J.G., Moses M.E. et al. Shifts in metabolic scaling, production, and efficiency across major evolutionary transitions of life // PNAS. 2010. V. 107. N

 29. P. 12941–12945. https://doi.org/10.1073/pnas.1007783107
- 23. *Duncan R.P., Forsyth D.M., Hone J.* Testing the metabolic theory of ecology: allometric scaling exponents in mammals // Ecology. 2007. V. 88. P. 324–333.

- 24. *Dvoretsky V.G., Dvoretsky A.G.* Regional differences of mesozooplankton communities in the Kara Sea // Cont. Shelf Res. 2015. V. 105. P. 26–41.
- 25. *Epp R.W., Lewis Jr. W.M.* The nature and ecological significance of metabolic changes during the life history of copepods // Ecology. 1980. V. 61. № 2. P. 259–264.

https://doi.org/10.2307/1935183

 Forest A., Galindo V., Darni, G. et al. Carbon biomass, elemental ratios (C: N) and stable isotopic composition (δ¹³C, δ¹⁵N) of dominant calanoid copepods during the winter-to-summer transition in the Amundsen Gulf (Arctic Ocean) // J. Plankton Res. 2010. V. 33. № 1. P. 161–178. https://doi.org/10.1093/plankt/fba103

https://doi.org/10.1093/plankt/fbq103

- Gillooly J.F., Brown J.H., West G.B. et al. Effects of size and temperature on metabolic rate // Science. 2001. V. 293. P. 2248–2251.
- Glazier D.S. Beyond the "3/4-power law": Variation in the intra- and interspecific scaling of metabolic rate in animals // Biol. Rev. 2005. V. 80. P. 611–662. https://doi.org/10.1017/S1464793105006834
- Glazier D.S. Is metabolic rate a universal "pacemaker" for biological processes? // Biol. Rev. 2014. V. 90. № 2. P. 377–407. https://doi.org/10.1111/brv.12115
- Head E.J.H., Harris L.R. Physiological and biochemical changes in Calanus hyperboreus from Jones Sound NWT during the transition from summer feeding to overwintering condition // Polar. Biol. 1985. V. 4. P. 99–106.
- 31. *Hemmingsen A.M.* Energy metabolism as related to body size and respiratory surfaces, and its evolution // Report of Steno Memorial Hospital (Copenhagen). 1960. V. 9. № 2. P. 1–110.
- 32. *Hirche H.-J.* Temperature and plankton. II. Effect on respiration and swimming activity in copepods from the Greenland Sea // Mar. Biol. 1997. V. 94. № 3. P. 347–356.
- Hirche, H.-J., Kosobokova, K.N., Gaye-Haake, B. et al. Structure and function of contemporary food webs on Arctic shelves: a panarctic comparison. The pelagic system of the Kara Sea communities and components of carbon flow // Prog. Oceanogr. 2006. V. 71. P. 288–313.
- Ikeda T., Kanno Y., Ozaki K., Shinada A. Metabolic rates of epipelagic marine copepods as a function of body mass and temperature // Mar. Biol. 2001. V. 139. P. 587–596.
- 35. *Ikeda T., Skjoldal H.R.* Metabolism and elemental composition of zooplankton from the Barents Sea

during early Arctic summer // Mar. Biol. 1989. V. 100. P. 173–183.

- 36. *Ivleva I.V.* The dependence of crustaceans respiration rate on body mass and habitat temperature // Int. ReV. Hydrobiol. 1980. V. 65. № 1. P. 1–47.
- 37. *Kosobokova K., Hirche H.-J.* Biomass of zooplankton in the eastern Arctic Ocean — A base line study // Prog. Oceanogr. 2009. V. 82. № 4. P. 265–280.
- Kosobokova K.N., Hanssen H., Hirche H.-J., Knickmeier K. Composition and distribution of zooplankton in the Laptev Sea and adjacent Nansen Basin during summer, 1993 // Polar Biol. 1998. V. 19. P. 63–76.
- Makarieva A.M., GorshkovV.G., Li B.-L. et al. Mean mass-specific metabolic rates are strikingly similar across life's major domains: Evidence for life's metabolic optimum // PNAS. 2008. V. 105. No. 44. P. 16994–16999.

https://doi.org/10.1073/pnas.0802148105

- 40. Pasternak A., Drits A., Arashkevich E., Flint M. Differential impact of the Khatanga and Lena (Laptev Sea) runoff on the distribution and grazing of zooplankton // Front. Mar. Sci. 2022. 9:881383. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.881383
- 41. Savage V.M., Gillooly J.F., Woodruff W.H. et al. The predominance of quarter-power scaling in biology // Funct. Ecol. V. 18. P. 257–282.
- Takahashi K., Nagao N, Taguchi S. Respiration of adult female Calanus hyperboreus (Copepoda) during spring in the North Water Polynya // Polar Biosci. 2002. V. 15. P. 45–51.
- Tande K.S., Hassel A., Slagstad D. Gonad maturation and possible life cycle strategies in Calanus finmarchicus and Calanus glacialis in the northwestern part of the Barents Sea // Marine biology of polar regions and effects of stress on marine organisms / Eds. Gray F.S., Christiansen M.E. Chichester: Wiley, 1985. P. 141–155.
- 44. WarkentinM., Freese H.M., Karsten U., Schumann R. New and fast method to quantify respiration rates of bacterial and plankton communities in freshwater ecosystems by using optical oxygen sensor spots // Appl. Environ. Microbiol. 2007. V. 73. No. 21. P. 6722–6729. https://doi.org/10.1128/AEM.00405-07
- 45. *West G.B., Brown J.H., Enquist B.J.* A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. // Science. 1997. V. 276. P. 122–126. https://doi.org/10.1242/ jeb.01589

RELATIONSHIP BETWEEN RESPIRATION RATE AND BODY WEIGHT IN ARCTIC COPEPODS AT SUBZERO TEMPERATURE.

E. G. Arashkevich^{a, *}, A. V. Drits^a, A. F. Pasternak^a, S. E. Frenkel^b, V. A. Karmanov^a

^a Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ^b Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russia ^{*}e-mail: aelena@ocean.ru

Dependence of the respiration rate (*R*) on the animal's weight (*W*) is described by the equation $R = a W^{\circ}$, where the exponential coefficient *b* is usually taken equal to ³/₄. However, several authors indicate that the value of the coefficient *b* may vary with temperature changes as well as during ontogeny. In the Arctic seas, copepods spend most of their lives at temperature below or close to zero. Meanwhile, there are very few measurements of respiration rate at temperatures $\leq 0^{\circ}$ C, which does not allow us to estimate the overall *R(W)* dependence at these temperatures. The work was carried out in three cruises of the R/V "Akademik Mstislav Keldysh" in the Siberian Arctic seas in 2018–2020. Copepods caught from the sea were adapted to experimental temperature and placed in tightly capped vials filled with filtered sea water for 24 h. The oxygen concentration was measured with a fiber-optic oxygen probe. The results of 120 measurements of respiration rate and 111 measurements of body carbon in five species of copepods at a temperature of -1.5°C are presented. The obtained relationship between body carbon content (*W*) and the prosome length (*L*) was described by the equation $R = 0.077 W^{0.753}$. No effect of a subzero temperature on the coefficient *b* was found. The regression parameters of *R(W)* did not change with the ontogenetic development of *Calanus glacialis*.

Key words: Arctic zooplankton, respiration, body carbon content, temperature, Calanus glacialis
— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ —

УДК 595.384.12

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛИЧИНОК КРАБА-СТРИГУНА *CHIONOECETES OPILIO* В КАРСКОМ МОРЕ

© 2024 г. Э. В. Липухин*, А. К. Залота, А. В. Мишин, У. В. Симакова

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия *e-mail: lipukhin.e@gmail.com Поступила в редакцию 24.07.2023, г. После доработки 04.10.2023 г. Принята к публикации 18.12.2023 г.

Чужеродный краб-стригун опилио, Chionoecetes opilio, скорее всего, попал в Карское море из Баренцева моря как при миграции взрослых особей, так и на личиночной стадии. На данный момент в Карском море присутствует большое количество пелагических личинок, однако их происхождение до сих пор не уточнено. Личинки, вылупившиеся в Карском море, должны быть на более ранней стадии развития относительно баренцевоморских в связи с более поздним вылуплением. Личинки C. opilio и краба-паука Hyas araneus собраны в центральной и юго-западной части Карского моря в июле — начале августа 2019 г. Личинки распределялись по акватории неравномерно: основные скопления обнаружены на границе с Баренцевым морем в желобе Святой Анны (до 860 экз/м²), также относительно высокие концентрации личинок отмечены в юго-запалной части моря (18-302 экз/м²). В зоне действия Обско-Енисейского плюма личинки крабов отсутствовали либо их численность была минимальной. С помощью молекулярно-генетических методов достоверно определена видовая принадлежность личинок. Установлены достоверные отличия в размерах на стадии зоеа II между C. opilio и H. araneus. На большей части акватории Карского моря в июле 2019 г. личинки крабов были представлены зоеа I C. opilio с единичными экземплярами зоеа I *Н. агапеиs* карскоморского происхождения, и лишь в юго-западной части на границе с Баренцевым морем наблюдалось присутствие в пробах зоеа II C. opilio и H. araneus с увеличением доли последнего вида в уловах, которые, по-видимому, имели уже баренцевоморское происхождение.

Ключевые слова: Карское море, краб-стригун опилио, чужеродный вид, размерная структура, личинки, репродукция популяции

DOI: 10.31857/S0030157424020084 EDN: RVJZGQ

введение

Краб-стригун опилио, *Chionoecetes opilio*, является вселенцем и важным промысловым видом в Баренцевом море [1, 4]. В течение последних двух десятилетий наблюдается его продвижение на восток и развивающаяся инвазия краба-стригуна из Баренцева в Карское море [3, 45–47]. В 2010 и 2011 гг. несколько особей были пойманы в желобе Святой Анны [11], а в 2012 г. на западе Карского моря были найдены взрослые крабы и планктонные личинки *C. opilio* [48]. Появление краба-стригуна в новой для него экосистеме Карского моря сопровождается значительным ее изменением [8].

В ходе многолетних наблюдений за динамикой распространения краба-стригуна в Карском море [3, 45–47, 49] в пробах отмечены самки с икрой на плеоподах. Их икра находится чаще всего на ранней стадии развития. Почти не встречаются недавно отметавшие самки, что подвергает сомнению местный источник основной массы личинок. Является ли Баренцево море единственным источником пополнения и воспроизводства *С. opilio*, или популяция краба-стригуна в Карском море самовоспроизводящаяся?

Личиночный пелагический период жизни краба-стригуна делится на три стадии: зоеа I и II и мегалопа [23, 24] (рис. 1). По различным оценкам продолжительность каждой стадии составляет от 35 до 82 дней для зоеа I, от 36 до 84 дней для зоеа II и от 42 до 80 дней для мегалопы, что дает общую личиночную фазу от 113 до 246 дней (16—35 недель) [20, 34, 42, 43]. Мегалопа оседает на дно, линяет, превращаясь в ювенильную, а затем во взрослую особь, претерпевая периодические линьки [45].

Температура влияет на продолжительность личиночной стадии. Эксперименты кажлой по выращиванию личинок показали, что период развития, необходимый для достижения каждой личиночной стадии, сокращается с повышением температуры [22, 42]. Оптимальная же температура для существования зоеа I краба-стригуна составляет около 11°С. Лабораторные эксперименты показывают, что первая линька проходит успешно при температурах от 9 до 15°С, а уже при менее 6°С и при более 18°С наблюдалось снижение выживаемости личинок [33]. Отмечается, что развитие зоеа I в зоеа II было медленнее при 9.5°C (24-38 дней) по сравнению с 14°С (15 дней). Напротив, показано, что развитие мегалопы было медленнее, чем у зоеа, по мере повышения температуры от 4 до 17°С. Оптимальная температура для ее развития, по-видимому, составляет около 9°С, что еще раз свидетельствует о том, что эта последняя личиночная стадия более приспособлена к холоду, чем предыдущие стадии [33]. Соленость также влияет на выживаемость и продолжительность личиночных стадий. Оптимальные уровни солености для зоеа находятся в промежутке 29-35 psu, а для мегалопы — 25-34 psu [43].

Зимой поверхностная температура воды Карского моря изменяется от −1.3 до −1.7°С [35]. Летние температуры на глубине до 15 м составляют 6-12°С. На удаленной от кромки льда акватории, при наличии плаваюшего льда, показатели температуры равны зимним. Глубже температура падает вплоть до -1.5°C у дна [35]. Помимо низких температур, для этого района характерна высокая ледовитость. Лед начинает вставать в середине октября и покрывает большую часть моря вплоть до середины июля. причем в северной части лед существует круглый год [6, 7]. Однако с середины 2000-х годов в Карском море наблюдается общая для Арктики тенденция замедления образования льда осенью и более раннего его распада весной или в начале лета [46].

Средняя соленость Карского моря колеблется в районе 33–34 psu. Снижению солености в верхних водных слоях способствует значительный речной сток из рек Обь и Енисей [6, 31]. В регионах, подверженных пресноводному стоку, соленость находится на уровне 3–5 psu. Таким образом, воды Карского моря по абиотическим характеристикам подходят для развития личинок краба-стригуна.

В летние месяцы в Карском море происходит таяние морского льда, которое значительно понижает соленость и сопровождается цветением воды. Оно является триггером для вылупления личинок крабов-стригунов [38]. В разные годы даты начала весеннего цветения отличаются из-за погодных условий, но в Карском море оно обычно приходится на конец июня [18]. Баренцево

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

море никогда полностью не покрывается льдом из-за теплых течений [29]. Здесь цветение обычно начинается в апреле в южной части моря, распространяясь по всей акватории, достигая пика в мае-июне [15]. Это способствует более раннему вылуплению личинок краба-стригуна в Баренцевом море.

Личинки краба-стригуна могут попадать в Карское море из Баренцева двумя основными путями: через желоб Святой Анны и через пролив Карские ворота, откуда поступают более теплые и соленые водные массы [9, 10, 14, 32]. Поступающие баренцевоморские воды являются крайне благоприятной средой для быстрого роста и развития личинок краба-стригуна. Подходящие условия для развития личинок в Карском море складываются позже, чем в Баренцевом море [29], и этот временной разрыв может обусловливать расхождение в размерах личинок из двух морей.

До появления *C. opilio* в Карском море обитал только один представитель крабов — *Hyas araneus*, но только в приграничной с Баренцевым морем зоне [5]. Оба краба относятся к одному семейству (*Oregoniidae*) и имеют визуально трудно различимые личинки на стадиях зоеа I и II [28, 30]. В Баренцевом море ранее была предпринята попытка идентификации личинок с помощью секвенирования по Сэнгеру, по результатам которой личинки *C. opilio* однозначно определялись, и не было обнаружено ни одной зоеа *H. araneus* [19].

Жизненный цикл *H. araneus* так же, как и у опилио, включает в себя эмбриональную, личиночную, состоящую из зоеа I и II и мегалопы, и взрослую стадии [37]. В Северном море обнаружено, что личинки *Hyas araneus* так же, как и личинки краба-стригуна, вылупляются в период арктического весеннего цветения [40]. Развитие личинок *H. araneus* также зависит от температуры. Однако Волтер и соавт. (2010) [40] считают, что раз зоеа II встречается с апреля по май в Северном море, когда температура повышается до ~9°С, а мегалопа — с мая по июль при температуре ~16°С, то пелагиальные стадии краба-паука могут быть предварительно адаптированы к низким температурам, в то время как мегалопы предпочитают более теплые условия.

Происхождение большого количества личинок *C. opilio*, наблюдаемых в Карском море, неоднозначно, так как самки с созревшей кладкой или только отметавшие икру встречаются там крайне редко. Таким образом, основной целью данной работы является определение происхождения личинок краба-стригуна опилио в Карском море. Личинки *C. opilio*, вылупившиеся в Карском море, должны быть на более ранней стадии развития и иметь меньшие средние размеры по сравнению с попавшими сюда баренцевоморскими личинками в связи с более поздним карскоморским весенним цветением и, соответственно, более поздним вылуплением. Следовательно, первичной задачей данной работы было достоверно отличить зоеа двух видов: *С. opilio* и *H. araneus* с помощью молекулярно-генетических методов и выявить различия в размерах личинок, которые могут пролить свет на их происхождение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал был собран в центральной и юго-западной частях Карского моря в ходе 76-го рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" (АМК 76) с 07.07 по 02.08.2019, выполненного в рамках многолетней программы "Экосистемы морей Сибирской Арктики". Всего было выполнено 30 косых ловов на горизонте 50-0 м, либо дно-поверхность в случае меньшей глубины на станции (рис. 2, табл. 1). В качестве орудия лова использовали зоопланктонную сеть Бонгос диаметром входного отверстия 60 см и с ячеей фильтрующего конуса 500 мкм. Сеть была оснащена датчиком давления (Mili-DT, фирмы Star-Oddy) для точной регистрации нижней границы горизонта лова и вертушкой-счетчиком профильтрованного объема воды (Hydrobios). Материал фиксировался и хранился в 96% этаноле. Поскольку вертикальная протяженность горизонтов лова различалась между станциями, численность личинок крабов в пробах пересчитывали на количество под 1 м² поверхности воды по формуле:

$$N = (n \times H) / V,$$

где N — численность личинок (экз/м²), n — число личинок в пробе (шт), H — вертикальная протяженность горизонта лова (м), V — профильтрованный объем воды (м³).

Личинки краба были отобраны из проб пинцетом под бинокуляром, помещены в этикетированные полиэтиленовые банки (объемом 50 мл), после чего тотально зафиксированы в 96% спирте. Через 3 дня после фиксации спирт полностью сменяли. В дальнейшем пробы хранили при температуре –20°С до обработки в 2022–2023 гг.

На станциях, наиболее удаленных друг от друга: 6222, 6224, 6236, 6257 и 6281, личинки были отобраны для молекулярно-генетических и морфологических исследований, со станции 6282 только для морфометрии (рис. 2, табл. 1). Промеры включали в себя следующие параметры: DSL — длина спинного шипа, RSL — длина рострального шипа, и CL — длина панциря (рис. 1а) [19].



Рис. 1. Пелагические личиночные стадии *C. opilio* (верхний ряд) и *H. araneus* (нижний ряд) с иллюстрацией сделанных измерений (RDL — ростродорсальная длина, DSL — длина спинного шипа, RSL — длина рострального шипа, CL — длина панциря). а — зоеа I *C. opilio*, б — зоеа II *C. opilio*, в — мегалопа *C. opilio*, г — зоеа I *H. araneus*, д — зоеа II *H. araneus*, е — мегалопа *H. araneus*.

Из 361 измеренной целой личинки краба выделяли ДНК прямым лизисом [41]. Высушенные от этанола образцы помещали в 200 мкл буфера для лизиса (10х TAQ буфер без MgCl2, 20х протеиназы K, 10х Chelex 100) и инкубировали в течение 1 ч при 56°C, а затем — 10 мин при 95°C. После центрифугирования (2500 g) 100–150 мкл супернатанта переносили вчистую пробирку и хранили при -20°C.

В данной работе применяли два метода определения видовой принадлежности конкретного образца. Вначале идентификацию проводили с помошью секвенирования по Сэнгеру и анализа сходства последовательностей с референсными данными, полученными для взрослых и однозначно идентифицированных представителей обоих видов. Однако этот метод довольно дорог и трудоемок. Поэтому для идентификации протестировали и модифицировали методику с использованием ПЦР в реальном времени из работ [21] и [44]. Полученный подход позволяет получить результаты идентификации для большого количества образцов (до нескольких сотен) в течение одного дня (от момента начала выделения ДНК до получения таблицы данных о видовой принадлежности образцов). Несколько личинок были определены двумя способами (табл. 1).

ПЦР участка гена субъединицы 1 шитохром-с-оксидазы (COI) или баркодового региона проводили с помощью HS-ScreenMix (Evrogen, Россия) в соответствии с рекомендациями произволителя и пары универсальных праймеров HCO2198-LCO1490 [16] при температуре отжига 52°С. Качество проведенной ПЦР оценивали с помощью агарозного (2%) гель-электрофореза. Очистку ПЦР-продукта проводили методом прямого переосаждения ДНК с этиловым спиртом в присутствии ацетата аммония в мягких условиях [2]. Секвенирование по Сэнгеру было проведено с помощью тех же праймеров, что и ПЦР, с помощью набора реактивов ABI PRISM® BigDve™ Terminator v. 3.1 с последующим анализом продуктов реакции на автоматическом секвенаторе ABI PRISM 3500 в компании "Синтол". Полученные хроматограммы в формате abl обрабатывали и собирали в одну консенсусную последовательность в программе CodoneCode Aligner (CodonCode Corporation, Dedham, Massachusetts). Для сравнения последовательностей с помощью алгоритма BLAST использовали базу данных GeneBank (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/) и базу данных последовательностей взрослых идентифицированных специалистами крабов *C. opilio* и *H. araneus*, полученных ранее в ИО РАН (Симакова и др., неопубл.).

ПЦР в реальном времени проводили с помощью набора 5X qPCRmix-HS (Evrogen, Россия) с SYBR Green I в соответствии с рекомендациями производителя. В качестве специфических для С. opilio праймеров использовали СО-F и СО-R [21], а качестве положительного внутреннего контроля — пару универсальных праймеров 18S-uni-F и 18S-uni-R для участка гена малой субъединицы рибосомальной РНК (18S) [44] при температуре отжига 65°С. Готовили общий мастермикс, который затем делили на 2 части, в каждую добавляли соответствующие праймеры (по 2 пмоль на реакцию) и вносили в лунки для ПЦР. Реакции со специфическими и универсальными праймерами проводили в одной плашке в течение одного запуска (95°С в течение 5 минут, 40 циклов 20 секунд при 95°С, 30 секунд при 65°С, считывание флуоресценции, плавление от 40 до 95°С с промежутком в 0.5° C) в амплификаторе CFX Opus 96 Real-Time PCR System (Bio-Rad Laboratories, Inc., США). Данные об изменении флуоресценции обрабатывали в программе CFX Manager[™] Software (Bio-Rad Laboratories, Inc., США) [27]. Результат считался положительным для обоих праймеров при достижении Ct на 30 цикле и ранее.

Корреляционный анализ между ростродорсальной длиной (RDL) и длиной панциря (CL), длиной спинного шипа (DSL) и длиной рострального шипа (RSL) (рис. 1а) был произведенв про-

Ст.	Общее кол-во	C anilia must (x^2)	Сиквенс		Измерено	
	личинок	С. оршо, лич./м²	по Сэнгеру	РІ-ШЦР	H. araneus	C. opilio
6222	683	137.1	95	0	1	94
6236	3506	350.2	16	94	1	93
6224	146	32.8	0	6	0	6
6257	346	14.9	0	88	1	87
6281	286	43.4	0	78	14	64
6282	385	90.8*	0	0	_	_

Таблица 1. Количество всех пойманных личинок и пересчитанная плотность только личинок *С. opilio* на станциях (Ст.), с которых были отобраны особи для морфометрических измерений и определения видовой принадлежности с помощью метода секвенирования по Сэнгеру и с помощью метода ПЦР в реальном времени (РТ-ПЦР)

* Плотность всех личинок, пойманных на станции 6282, без определения видовой принадлежности.

грамме MS Excel (Microsoft Corporation, США). Количество размерных групп определяли в программе Past 4.03 [17] с помощью разделения смешанного распределения на нормально распределенные группы (mixture analysis), основываясь на показателях измерений RDL — ростродорсальной длины. Для оценки качества предсказаний модели использовались два показателя: критерий Акаике (AIC; Akaike) и параметр логарифмического правдоподобия (Log ik.hood). Информационный критерий Акаике [12] рассчитывается с поправкой на малую выборку.

Достоверное отличие групп друг от друга было проверено с помощью многомерного дисперсионного анализа (MANOVA) и дисперсионного анализа (ANOVA), также выполнен Post hoc анализ Тьюки. Соответствие данных исходными положениям дисперсионного анализа — нормальное распределение значений и равенство дисперсий — проверяли тестом Шапиро–Вилка и t-критерием Левене соответственно. Все перечисленные тесты проводились в программе RStudio [36].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Установлено два основных района концентрации личинок: первый, относительно локальный, район находился в северной части моря в желобе Святой Анны на границе с Баренцевым морем, где численность личинок изменялась в пределах от 167 до 860 экз/м²; второй район с относительно высокой численностью личинок был расположен в юго-запалной части акватории. гле численность колебалась в пределах 50-300 экз/м² (рис. 2). В центральной части Карского моря. особенно в зоне с пониженной поверхностной соленостью, — непосредственно в районе распространения Обско-Енисейского плюма и на его границах — численность пелагических сталий развития крабов резко снижалась, а на границе с Обским эстуарием они полностью отсутствовали. В северной и центральной части акватории личинки были представлены зоеа I C. opilio с единичным и экземплярами зоеа I H. araneus (рис. 2, табл. 1). В юго-западной части на границе с Баренцевым морем, помимо зоеа I, наблюлали присутствие в пробах зоеа II C. opilio и H. araneus, с увеличением доли последнего вида в уловах.

Для молекулярно-генетического и морфометрического анализа была отобрана 361 личинка краба на стадии зоеа с 5 станций (кроме ст. 6282) (рис. 2, табл. 1). С помощью секвенирования по Сэнгеру получены последовательности 111 личинок *Chionoecetes opilio* и *Hyas araneus* (табл. 1), обитающих в Карском море. При сравнении последовательностей, выявлено, что сходство между



Рис. 2. Общее распределение личинок крабов *C. opilio* и *H. araneus* (экз/м²) и приповерхностного хлорофилла-а (цветами показаны перепады концентрации хлорофилла-а, мг/м³, где синий цвет обозначает минимальное его содержание, а красный — максимальное) на акватории Карского моря с 07.07 по 02.08.2019. Жирным выделены станции отбора личинок для молекулярно-генетического и морфометрических исследований, звездочкой отмечены станции, где обнаружены личинки *H. araneus*. 1 – 0 экз/м², 2 – 1 экз/м², 3 – 10 экз/м², 4 – 100 экз/м², 5 – 500 экз/м², 6 – 860 экз/м². Данные по хлорофиллу получены со спутника Aqua-MODIS и усреднены за июль 2019 г. (https://oceancolor.gsfc.nasa. gov/cgi/browse.pl).

двумя видами составляет около 88–89% [39]. Таким образом, даже не очень длинного прочтения (<500 п.н.) в одну сторону оказалось достаточно для видовой идентификации при прямом сравнении с эталонными последовательностями, принадлежащими к однозначно идентифицированным взрослым особям. 266 личинок были определены с использованием ПЦР в реальном времени (16 из них уже были определены с помощью секвенирования по Сэнгеру). Определение видовой принадлежности для личинок со станции 6282 по техническим причинам произвести не удалось.

Корреляционный анализ измеренных параметров показал, что длины анатомических структур (RDL к DSL, RSL и CL) личинок *C. opilio* и *H. araneus* линейно соотносятся (рис. 3, табл. 2). Линейное соотношение между RDL и DSL/RSL не удивительно, так как DSL и RSL — части, составляющие RDL. Однако RDL и CL — независимые величины, но при этом сохраняютлинейную зависимость. Таким образом, для последующего анализа обосновано использовать только один параметр из 4-х (RDL), так как он имеет наибольшее значение коэффициента корреляции со всеми остальными параметрами и, следовательно, наиболее репрезентативен. На графике (рис. 3) выявляются 4 размерные группы, существование которых подтверждается последующим анализом. Причем *H. araneus* образует две размерные группы, одна из которых накладывается на самую многочисленную размерную группу краба-стригуна опилио.

Анализ с помощью разделения смешанного распределения на нормально распределенные

Таблица 2. Результаты корреляционного анализа размерных параметров (RDL — ростродорсальная длина, DSL — длина спинного шипа, RSL — длина рострального шипа, CL — длина панциря) определенных и измеренных личинок *C. opilio* (344 особи) и *H. araneus* (17 особей) из рейса AMK 76, 2019 г.

		RDL	DSL	RSL	CL	
	0.95	0.7	0.93			
	DSL	0.9		0.51	0.91	Hyas araneus
Chionoecetes opilio	RSL	0.76	0.56		0.52	
	CL	0.76	0.64	0.44		



Рис. 3. Отношение ростродорсальной длины (RDL) к длине спинного шипа (DSL, черные значки), длине рострального шипа (RSL, светло-серые), длине панциря (CL, темно-серые). Кругами и сплошной линией показаны личинки *C. opilio* (C.o.), треугольники и прерывистая линия — *H. araneus* (H.a.).

группы размеров RDL всех измеренных личинок выявил нестабильный результат для четырех размерных групп (средние значения RDL ± стандартное отклонение 4.1 ± 0.1 , 4.8 ± 0.2 , 5.4 ± 0.1 и 6.4 ± 0.3 мм соответственно; Log ik.hood = 304.3 и Akaike IC = -592.3) (рис. 4). При раздельном анализе размеров личинок для *C. opilio* стабильно определяются три размерных группы со средними значениями RDL ± стандартное отклонение: 4.1 ± 0.1 и 4.8 ± 0.2 мм — на стадии зоеа I, и 6.4 ± 0.3 мм — на стадии зоеа II (Log ik.hood = 395 и Akaike IC = -777.7). Анализ только личинок *Н. araneus* выявил схожую с крабом-стригуном группу на стадии зоеа I (4.7 ± 0.2 мм) и отдельную группу на стадии зоеа II (5.5 \pm 0.1 мм) (Log ik. hood = 395 и Akaike IC = -777.7). При раздельном анализе данных с каждой станшии группа с малыми размерами (4.1 ± 0.1 мм) выделялась только на станциях у пролива Карские Ворота (ст. 6281 и 6282). На станции в центре Карского моря (ст. 6222) была найдена только одна личинка с малыми размерами (RDL 4.2 мм).

Для подтверждения достоверности выделенных групп был произведен многомерный дисперсионный анализ для всех четырех морфометрических измерений (RDL, DSL, RSL и CL), для всех измеренных личинок. Он показал, что существует статистически значимая разница (Df = 3; F = 61.1; p < 2.2e-16) между всеми размерными группами в целом и по каждому измеренному параметру RDL, DSL, RSL и CL. В частности, был произведен дисперсионный анализ для RDL (Df =3; F =857.8; p < 2e-16) с последующим posthoc анализом (средневзвешенное Тьюки p = 0), которые также подтвердили достоверное отличие всех размерных групп. Это подтверждает корректность результатов, полученных с помощью анализа разделения смешанного распределения на нормально распределенные группы. Нормальность распределения данных была подтверждена с помощью теста Шапиро–Уилка (W = 0.1, p = 0.5) и однородность дисперсии с помощью теста Левене (Df = 3; F = 5.3; p = 0.001).

Для каждой станции было произведено разделение смешанного распределения на нормально распределенные группы только для личинок *C. opilio*, для подтверждения присутствия основных размерных групп, выявленных во время общего анализа (табл. 3). Для станции 6281 к анализу добавили размеры личинок *H. araneus*, где их было наибольшее количество, чтобы посмотреть, будут ли выделяться личинки *H. araneus* в отдельную размерную группу.

На самой северной станции в желобе Св. Анны (ст. 6236) и в центре Карского моря (ст. 6222 и 6257) (табл. 3) выделялась одна размерная группа (2; Log ik.hood = 107.2, 123.9, 125.2 и Akaike IC = -210.3, -243.6, -246.3 соответственно), не считая одной особи малых размеров на ст. 6222.



Рис. 4. Размерные группы на основе размеров ростродорсальной длины (RDL, мм) и стадии развития всех измеренных личинок, выделенные с помощью разделения смешанного распределения на нормально распределенные группы, на всех обработанных станциях (6222, 6224, 6236, 6257, 6281, 6282) рейса AMK 76 в 2019 г. На графике жирным шрифтом указаны средние величины размерных групп.

Таблица 3. Результаты разделения смешанного распределения на нормально распределенные группы для длин RDL (средние ± стандартное отклонение в мм) личинок *C. opilio* и *H. araneus* из рейса AMK 76 в 2019 г. Все личинки со станции 6282 были проанализированы без определения видовой принадлежности. *N* — количество особей в каждой размерной группе, соответственно

Станция	рил	Размер	рные группы (ср	р. RDL ± стд.от	к., мм)	λī	
	Бид	1	2	3	4	11	
(222	C. opilio	4.2	4.8 ± 0.2			1/93	
0222	H. araneus	4	4.7			1	
6224	C. opilio		4.9 ± 0.1			6	
(22)	C. opilio		4.8 ± 0.2			93	
0230	H. araneus		4.8			1	
6257	C. opilio		4.8 ± 0.2			87	
	H. araneus		4.4			1	
6281	C. opilio	4 ± 0.1	4.8 ± 0.2		6.6 ± 0.2	2/56/6	
	H. araneus		4.7 ± 0.2	5.5 ± 0.1		5/9	
6282	NA	4.2	5 ± 0.3	5.4 ± 0.1	6.4 ± 0.3	1/7/6/26	

Из-за малого количества личинок в центре моря на ст. 6224 отдельный статистический анализ был невозможен. Однако все измеренные оттуда особи попадали во вторую размерную группу со средней длиной RDL 4.8 \pm 0.1 мм (макс. 4.94 мм; мин. 4.64 мм).

На станциях у пролива Карские Ворота, со стороны Карского моря (ст. 6281) и со стороны Баренцева моря (ст. 6282), выделялись все четыре размерные группы (Log ik.hood = 44.44 и 11.48 и Akaike IC = -70.8 и -2.158 соответственно, однако для ст. 6282 результаты были не стабильны из-за малой выборки, табл. 3). На станции 6281. где был определен видовой состав личинок, в третьей размерной группе (5.5 ± 0.1 мм) присутствовали только личинки *H. araneus*, а во второй размерной группе (4.8 ± 0.2 мм) как личинки *C. opilio*, так и *H. araneus*. На станциях 6222, 6236 и 6257, где присутствовали единичные особи *H. araneus*, они попадали во вторую размерную группу. Таким образом, можно предположить, что на станции 6282 со стороны Баренцева моря личинки в третьей размерной группе принадлежат *H. araneus*, а во второй есть и те, и другие.

ОБСУЖДЕНИЕ

Численность всех найденных крабовых личинок в разных районах Карского моря варьирует вследствие воздействия множества факторов (репродуктивной способности местной популяции краба, температуры, течений, удаленности от источника пополнения) (рис. 2). При пересчете численности личинок только краба-стригуна опилио плотность падает неравномерно по морю, так как на севере и в центре акватории находки *H. araneus* единичны, а на юге — намного более

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

многочисленны (табл. 1). Поэтому при изучении динамики личинок *C. opilio* в Карском море необходимо проверять количественное соотношение этих двух видов в пробе.

Опреснение от стока рек Оби и Енисея (приближенно показанное распределением хлорофилла мг/м³, рис. 2) сильно уменьшало или полностью лимитировало присутствие личинок на станциях 6239-6246. Личинки очень чувствительны к солености, и ее низкий уровень (3-5 psu) губителен для зоеа [13, 43]. На севере, в области захода баренцевоморских вод, на фронтальной зоне склона желоба Св. Анны, было собрано самое большое количество личинок. В проливе Карские Ворота, несмотря на сильную подверженность влиянию Баренцева моря. плотность личинок была гораздо ниже, что может быть связано с плотностью поселения взрослых особей в указанных районах. Тем не менее она была все еще выше, чем в центре Карского моря. Скорее всего, это связано с тем. что, во-первых, из Баренцева моря через желоб и пролив поступают личинки и здесь же накапливаются, смешиваясь с популяцией местных личинок. Во-вторых, в этих районах подверженность речному стоку меньше, чем в центре моря (рис. 2), и меньше личинок погибает.

Показано, что вылупление личинок сопряжено с началом весеннего цветения воды фитопланктоном [38]. Начало цветения на северной окраине акватории наступает позже, чем на юге, соответственно, вылупление личинок тоже. Только в проливе Карские Ворота были обнаружены личинки, успевшие вырасти до стадии зоеа II, тогда как в центре и на севере — только зоеа I. Весенние сборы на севере Баренцева моря обнаружили личинки краба-стригуна только на стадии зоеа I [19]. Возможно, поэтому плотность личинок в желобе Св. Анны выше, так как личинки недавно вылупились по сравнению с проливом Карские Ворота, и их численность не успела снизиться так сильно за счет выедания хищниками, естественной смертности и т.д.

Средние показатели RDL второй размерной группы найденных нами личинок соответствуют литературным о размерах зоеа I (4.93 ± 0.18 мм в Баренцевом море [19], 4.92 ± 0.17 мм и 4.90 (4.70-5.08) мм в Атлантическом океане [34]). Поэтому на станции в желобе Святой Анны (ст. 6236) единственная выделяемая размерная группа (RDL 4.8 ± 0.2 мм) может включать личинки зоеа I, которые родились как на севере Баренцева моря, так и в Карском.

Как и в желобе Св. Анны, на центральных станциях (6222, 6224, 6257) выделяется единственная вторая размерная группа (4.8 \pm 0.2 мм). При этом численность личинок на этих станциях гораздо ниже окраинных. Следовательно, скорее всего, на этих станциях собраны зоеа I, которые родились в Карском море. Занесенные личинки из Баренцева значительно повышали бы плотность особей и выделялись бы в отдельную, более крупную по средней длине RDL, размерную группу, так как за время пути от окраины в центр моря они успели бы вырасти.

Только на юге, в проливе Карские Ворота, появляются более крупные по размеру личинки, которые выделяются в отдельную размерную группу. Они находятся на следующей стадии — зоеа II (рис. 1б), так как у них отмечается наличие брюшных ног [25, 26]. Их происхождение, скорее всего, баренцевоморское, так как на станции из Баренцева моря (ст. 6282) соответствующая четвертая размерная группа наиболее многочисленна. В то время как со стороны Карского моря наиболее многочисленная группа на стадии зоеа I (RDL 4.8 \pm 0.2 мм), которую в основном составляют особи карскоморского происхождения и не успевшие дорасти баренцевоморские особи. На этих же станциях найдены многочисленные личинки *H. araneus*, на стадиях зоеа I и зоеа II (рис. 1г, д) [25, 26].

Самая малочисленная и маломерная размерная группа личинок краба-стригуна со средней длиной RDL 4.0 \pm 0.2 мм присутствует только на станциях у пролива Карские Ворота. Она выбивается как из всех литературных, так и из полученных нами данных и состоит только из особей краба-стригуна. Ее присутствие, возможно, может быть связано с затоком вод из Печорского моря. Там из-за неоптимальных условий (сильного влияния речного стока и, соответственно, пониженной солености) личинки долго и плохо развиваются [43]. Размерная группа зоеа I краба-паука полностью совпадает с присутствующей на всех стациях размерной когортой личинок краба-стригуна (рис. 3), а зоеа II краба-паука выделяется в отдельную группу. Про жизненный цикл и оптимальные условия обитания *H. araneus* известно мало, но, возможно, у этих размерных групп так же, как и у личинок краба-стригуна, разное место происхождения.

Личинки *H. araneus* на севере (6236) и в центре Карского моря (6222, 6224, 6257) находятся в очень маленьком количестве (табл. 1), что, скорее всего, связано с ареалом взрослых особей этого краба. *H. araneus* не встречается в центре и на севере Карского моря, и, видимо, течения не уносят вылупляюшихся личинок далеко от южной части моря. В исследовании, проведенном весной 2021 г. на севере Баренцева моря личинок *H. araneus* также не было найдено [19]. Возможно, поэтому в желобе Св. Анны они тоже не обнаруживаются. Низкое количество личинок *H. araneus* в центре Карского моря еще раз подтверждает предположение, что личинки в центре имеют в основном карскоморское происхождение, и баренцевоморские личинки туда заносятся в очень малом количестве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краб-стригун опилио, *Chionoecetes. opilio* важнейший промысловый вид и играет существенную роль в жизни экосистемы. Он вселился в Карское море из Баренцева моря относительно недавно (около 10 лет назад) и не успел еще полностью адаптироваться. Способность чужеродного вида воспроизводиться в инвазионном ареале является основной вехой в развития вселения и его способности акклиматизироваться на новой территории. На основе размерной структуры и численного распределения личинок данное исследование подтверждает, что популяция крабастригуна опилио в Карском море является самовоспроизводящейся.

Личинки из Баренцева моря более крупные из-за временного расхождения начала схода льда и цветения фитопланктона в этих акваториях. В центре Карского моря присутствует небольшое количество личинок краба-стригуна только на ранней стадии развития, в то время как в Баренцевом море и на границе с ним численность личинок намного выше и присутствуют личинки на второй стадии развития.

Находки самок с икрой на плеоподах, у которой есть возможность вылупиться; высокая плотность личинок на границах двух акваторий и более низкая в центре Карского моря; наличие на всех станций общей размерной группы все это позволяет предположить, что популяция краба-стригуна в Карском море является самовоспроизводящейся.

Сотрудники отряда выражают глубокую признательность капитану Ю. Н. Горбачу и штурманской службе судна за обеспечение забортных работ. Особая благодарность научному руководству 76-го рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" во главе с академиком М. В. Флинтом за поддержку в проведении исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Судовые работы и сбор материала проведены в рамках государственного задания ИО РАН (№ FMWE-2021-0007). Обработка и анализ проб выполнен за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-00121).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баканев С.В., Жак Ю.Е., Павлов В.А. Пространственное распределение краба-стригуна опилио в Баренцевом море // Краб-стригун опилио *Chionoecetes opilio* в Баренцевом и Карском морях / Ред. Соколов К.М. и др. Мурманск: ПИН-РО, 2016. С. 74–84.
- 2. Глинская Н.А., Водчиц Н.В., Волкова Е.М., Каспирович Д.А. Методы работы с ДНК: методическое пособие. Пинск: ПолесГУ, 2017. 88 с.
- 3. Залота А.К. Размерная структура половозрелых крабов-стригунов *Chionoecetes opilio* (О. Fabricius, 1788) (Decapoda, Oregoniidae) в Карском море // Океанология. 2022. Т. 62. № 6. С. 933–942.
- 4. *Кузьмин С.А., Ахтарин С.М., Менис Д.Т.* Первые находки *Chionocoetes opilio* (Decapoda, Majidae) в Баренцевом море // Зоол. журн. 1998. Т. 77. № 4. С. 489–491.
- Мокиевский В.О., Цетлин А.Б., Азовский А.И. и др. Нуаs araneus // Виды — биологические индикаторы состояния морских арктических экосистем. Москва: Арктический Научный Центр, 2020. С. 158–159.
- Полухин А.А., Загретдинова Д.Р. Океанографическая характеристика Карского моря // Карское море. Экологический атлас. М.: Арктический Научный Центр, 2016. С. 53–76.

- 7. Путырский В.Е., Юлин А.В., Павлова Е.А., Кашкова В.С. Исследование динамики заприпайных полыньей Карского моря в зимний период // Природообустройство. 2021. № 4. С. 110–115.
- Руднева Е.В., Удалов А.А., Залота А.К., Чикина М.В. Изменение донных сообществ центральной части Карского моря в результате вселения краба-стригуна Chionoecetes opilio // Труды XI Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022". 2022. Т. 3. С. 320–324.
- Щука С.А., Кременецкий В.В., Недоспасов А.А., Корж А.О. Структура течений Карского моря. Экосистема Карского моря — новые данные экспедиционных исследований // Материалы научной конференции "Экосистема Карского моря. Новые данные экспедиционных исследований". 2015. М.: АПР. С. 34–39.
- Щука С.А., Кременецкий В.В., Недоспасов А.А., Корж А.О. Структура течений в проливе Карские Ворота. Экосистема Карского моря — новые данные экспедиционных исследований // Материалы научной конференции «Экосистема Карского моря. Новые данные экспедиционных исследований». 2015. М.: АПР. С. 39–43.
- Agnalt A.-L., Pavlov V., Jørstad K.E. et al. The snow crab, Chionoecetes opilio (Decapoda, Majoidea, Oregoniidae) in the Barents Sea // Springer Series in Invasion Ecology. 2011. V. 6.P. 283–300.
- Akaike H. A new look at the statistical model identification // IEEE Transactions on Automatic Control. 1974. V. 19. P. 716–723.
- 13. Charmantier G., Charmantier-Daures M. Osmoregulation and salinity tolerance in zoeae and juveniles of the snow crab Chionoecetes opilio // Aquatic Living Resources. 1995. V. 8. № 2. P. 171–179.
- 14. Dmitrenko I.A., Rudels B., Kirillov S.A. et al. Atlantic water flow into the Arctic Ocean through the St. Anna Trough in the northern Kara Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2015. V. 120. № 7. P. 5158–5178.
- Dvoretsky V.G., Dvoretsky A.G. Coastal mesozooplankton assemblages during spring bloom in the Eastern Barents Sea // Biology. 2022. V. 11. № 2. Art. 204. P. 19. https://doi.org/10.3390/ biology11020204
- 16. *Folmer O., Black M., Hoeh W. et al.* DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates // Mol. Mar. Biol. Biotechnol. 1994. V. 3. № 5. P. 294–299.
- Hammer Ø. PAST: Paleontological STudies Version 3.0: Reference Manuel. Natural History Museum. Olso. 2013. http://folk.uio.no/ohammer/past/past-3manual.pdf [последнее посещение 01.06.2023].
- Hirche H.J., Kosobokova, K.N., Gaye-Haake B. et al. Structure and function of contemporary food webs on Arctic shelves: A panarctic comparison // Progress in Oceanography. 2006. V. 71. № 2–4. P. 288–313.
- 19. Hjelset A.M., Danielsen H.E.H., Westgaard J.I., Agnalt A.L. Taxonomic and genetic confirmed findings of

snow crab (*Chionoecetes opilio*) larvae in the Barents Sea // PolarBiology. 2021. V. 44. № 11. P. 2107–2115.

- 20. Huserbråten M., Hjelset A.M., Danielsen H.E.H. et al. Modelled dispersal of snow crab (*Chionoecetes opilio*) larvae and potential settlement areas in the western Barents Sea // ICES Journal of Marine Science. 2023. V. 80. № 5. P. 1342–1350.
- Kang T.S. Rapid and simple identification of two closely-related snow crabs (*Chionoecetes opilio* and *P. japonicus*) by direct triplex PCR // LWT. 2019. V. 99. P. 562–567.
- 22. Kogane T., Hamasaki K., Nogami K. Effect of temperature on survival and developmental period of larval snow crab *Chionoecetes opilio* (Brachyura: Majidae) reared in the laboratory // Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries. 2005. V. 71. № 2. P. 161–164.
- 23. *Kon T*. Ecological studies on larvae of the crabs belonging to the genus *Chionoecetes*-I // Nippon Suisan Gakkaishi. 1979. V. 45. № 1. P. 7–9.
- Kon T., Adachi T., Suzuki Y. Distribution of snow crab, Chionoecetes spp., larvae off Wakasa Bay in the Sea of Japan // Fisheries science. 2003. V. 69. № 6. P. 1109–1115.
- 25. *Korn O.M., Kornienko E.S., Scherbakova N.V.* A key for the identification of larvae of brachyuran and anomuran crabs in spring plankton of Peter the Great Bay, Sea of Japan // Russian Journal of Marine Biology. 2010. V. 36. № 5. P. 373–382.
- 26. *Kornienko E.S., Korn O. M.* Illustrated key for the identification of brachyuran zoeal stages (Crustacea: Decapoda) in the plankton of Peter the Great Bay (Sea of Japan) // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 2009. V. 89. № 2. P. 379–386.
- Kralik P., Ricchi M. A basic guide to real time pcr in microbial diagnostics: definitions, parameters, and everything // Frontiers in Microbiology. 2017. V. 8. Pt. 108. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00108
- Kuhn P.S., Graham S., Choi J.S. Influence of senescent algae, temperature, tides, currents, and embryo detachment on *Chionoecetes opilio* (Snow Crab) larval release // Journal of Crustacean Biology. 2011. V. 31. N

 № 1. P. 100–105.
- Løset S., Shkhinek K., Gudmestad O.T. et al. Comparison of the physical environment of some Arctic seas // Cold Regions Science and Technology. 1999. V. 29. № 3. P. 201–214.
- 30. *Morita T.* Effects of water temperature on survival, spawning and hatching in adult female snowcrab, *Chionoecetes opilio*, under laboratory conditions, and a trial to determine larval quality // Saibai Gyogyo Gijutsu Kaihatsu Kenkyu. 2005. V. 71. № 2. P. 161–164.
- Osadchiev A.A., Frey D.I., Shchuka S.A. et al. Structure of the Freshened Surface Layer in the Kara Sea During Ice-Free Periods // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2021. V. 126. №1. P. e2020JC016486. https:// doi.org/10.1029/2020JC016486
- 32. Osadchiev A., Viting K., Frey D. et al. Structure and Circulation of Atlantic Water Masses in the St. Anna

Trough in the Kara Sea // Frontiers in Marine Science. 2022. V. 9. Art. 915674.

- 33. *Ouellet P., Sainte-Marie B.* Vertical distribution of snow crab (*Chionoecetes opilio*) pelagic stages in the Gulf of St. Lawrence (Canada) and effect of temperature on development and survival // ICES Journal of Marine Science. 2018. V. 75. № 2. P. 773–784.
- 34. Pohle G.W. Larval development of Canadian Atlantic oregoniid crabs (Brachyura: Majidae), with emphasis on *Hyas coarctatus alutaceus* Brandt, 1851, and a comparison with Atlantic and Pacific conspecifics // Canadian Journal of Zoology. 1991. V. 69. № 11. P. 2717–2737.
- 35. *Polyak L*. Benthic foraminiferal assemblages from the southern Kara Sea, a river-influenced arctic marine environment // The Journal of Foraminiferal Research. 2002. V. 32. № 3. P. 252–273.
- RStudio Team. 2016. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL http://www. rstudio.com/ [последнее посещение 01.06.2023].
- 37. Schiffer M., Harms L., Lucassen M. et al. Temperature tolerance of different larval stages of the spider crab *Hyas araneus* exposed to elevated seawater PCO2 // Frontiers in Zoology. 2014. V. 11. № 1. P. 1–22.
- 38. *Starr M., Therriault J.C., Conan G.Y. et al.* Larval release in a sub-euphotic zone invertebrate triggered by sinking phytoplankton particles // Journal of Plankton Research. 1994. V. 16. № 9. P. 1137–1147.
- Tamura K., Stecher G., Kumar S. MEGA11: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 11 // Molecular Biology and Evolution. 2021. V. 38. № 7. P. 3022–3027.
- Walther K., Anger K., Pörtner H. Effects of ocean acidification and warming on the larval development of the spider crab Hyas araneus from different latitudes (54° vs. 79°N) // Marine Ecology Progress Series. 2010. V. 417. P. 159–170.
- 41. Williams B.D., Schrank B., Huynh C., Shownkeen R., Waterston R. A genetic mapping system in Caenorhabditis elegans based on polymorphic sequence-tagged sites. // Genetics. 1992. V. 131. № 3. P. 609–624.
- 42. Yamamoto T., Yamada T., Fujimoto H., Hamasaki K. Effects of temperature on snow crab (*Chionoecetes opilio*) larval survival and development under laboratory conditions // Journal of Shellfish Research. 2014. V. 33. № 1. P. 19–24.
- 43. Yamamoto T., Yamada T., Fujimoto H., Hamasaki K. Effects of salinity on snow crab (*Chionoecetes opilio*) larval survival and development under laboratory conditions // Journal of Shellfish Research. 2015. V. 34. N

 2. P. 499–504.
- 44. Zagon J., Schmidt J., Schmidt A.S. et al. A novel screening approach based on six real-time PCR systems for the detection of crustacean species in food // Food Control. 2017. V. 79. P. 27–34.
- 45. Zalota, A.K., Spiridonov, V.A., Vedenin, A.A. Development of snow crab Chionoecetes opilio (Crustacea: Decapoda: Oregonidae) invasion in the Kara Sea // Polar

Biology. 2018. V. 41. № 10. P. 1983–1994. https://doi. org/10.1007/s00300-018-2337-y

- 46. Zalota A.K., Zimina O.L., Spiridonov V.A. Combining data from different sampling methods to study the development of an alien crab *Chionoecetes opilio* invasion in the remote and pristine Arctic Kara Sea // Peer J. 2019. V. 7. P. e7952. http://doi.org/10.7717/peerj.7952
- 47. Zalota A.K., Spiridonov V.A., Galkin S., Pronin A.A. Population structure of alien snow crabs (*Chionoecetes*

opilio) in the Kara Sea (trawl and video sampling) // Oceanology. 2020. V. 60. № 1. P. 83–88.

- 48. Zimina O.L. Finding the snow crab Chionoecetes opilio (O. Fabricius, 1788) (Decapoda: Majidae) in the Kara Sea // Russian Journal of Marine Biology. 2014. V. 40. № 6. P. 490–492.
- 49. Zimina O.L. Decapod Crustaceans of the Kara Sea: species composition and peculiarities of distribution // Proceedings of the Zoological Institute RAS. 2021. V. 325. № 3. P. 364–372.

THE ORIGIN OF THE CHIONOECETES OPILIO SNOW CRAB LARVAE IN THE KARA SEA

E. V. Lipukhin[#], A. K. Zalota, A. V. Mishin, and U. V. Simakova

Shirshov Institute of Oceanology. Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia #e-mail: lipukhin.e@gmail.com

Most likely, the non-indigenous snow crab opilio, *Chionoecetes opilio*, entered the Kara Sea from the Barents Sea, both due to the migration of adults and with currents at the larval stage. At the moment, all bottom stages, including mature individuals and a large number of pelagic larvae are present in the Kara Sea. However, the origin of the larvae has not yet been clarified. The larvae that hatched in the Kara Sea should be at an earlier stage of development compared to the Barents Sea larvae that got here due, to later development of phytoplankton and, accordingly, later hatching.

The larvae of the snow crab *Chionoecetes opilio* and the spider crab *H. araneus* were collected in the central and southwestern parts of the Kara Sea in July — early August 2019 by the Bongo zooplankton net 60 cm in diameter. It was established that the larvae were unevenly distributed across the Kara Sea. The main concentrations were found on the border with the Barents Sea in the St. Anna Trough (up to 860 ind./m²), and relatively high concentrations of larvae were noted in the southwesternpart, where their abundance at the stations varied from 18 to 302 ind./m². In the zone of the Ob-Yeniseiplume, crab larvae were absent or their abundance was minimal. Using molecular genetic methods, the species identity of 361 larvae (344 *C. opilio* and 17 *H. araneus*) was reliably determined, and measurements of a number of morphological structures were established. In most of the Kara Sea in July 2019, in zooplankton samples, crab larvae were represented by zoea I *C. opilio* with rare specimens of zoea I *H. araneus* of the Kara Sea origin. Only in the southwestern part, on the border with the Barents Sea, the presence of zoea II *C. opilio* and *H. araneus* was observed in samples with an increase in the proportion of the latter species in catches, which probably originate from the Barents Sea.

Key words: Kara Sea, snow crab opilio, alien species, size structure, larvae, population reproduction

—— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ ——

УДК 574.58

РАЗЛИЧИЯ СООБЩЕСТВ МЕГАБЕНТОСА ВОСТОЧНОЙ И ЗАПАДНОЙ ЧАСТЕЙ КАРСКОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЙ

© 2024 г. А. А. Удалов*, И. М. Анисимов, В. О. Муравья, А. В. Лесин, В. Ю. Кузьмин, А. К. Залота, М. В. Чикина

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

*e-mail: aludal@mail.ru Поступила в редакцию 20.07.2023 г. После доработки 31.08.2023 г. Принята к публикации 16.11.2023 г.

Впервые проведена количественная видеосъемка донной мегафауны на разрезе, выполненном в восточной части Карского моря от склона желоба Воронина до верхнего шельфа в диапазоне глубин от 1680 до 70 м. Данные получены с помощью БНПА "Видеомодуль" во время 89-го рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" осенью 2022 г. Показано, что мегабентос в этом районе существенно отличается от мегабентоса западной части моря и залива Благополучия (Новая Земля). В восточной части Карского моря преобладали иглокожие, среди которых первое место занимали офиуры, тогда как в западной части моря и в заливе Благополучия ключевым компонентом мегафауны был краб-стригун *Chionoecetes opilio*. Единичные взрослые особи *Ch. opilio* были отмечены впервые практически на всех станциях в восточной части моря, однако, в отличие от западной части, краб-стригун здесь еще не стал доминирующим и не оказал влияния на бентосные сообщества.

Ключевые слова: мегабентос, видеонаблюдения, Карское море **DOI:** 10.31857/S0030157424020099 **EDN:** RVJORE

ВВЕДЕНИЕ

Мегафауна является одним из важнейших компонентов донных экосистем [40, 42, 43]. Крупные организмы играют важную роль в трансформации вещества и энергии, находясь в ключевых местах трофических цепей, будучи как хищниками, так и активными детритофагами-собирателями [33, 44]. Кроме того, достаточно активно модифицируя субстрат, они являются ландшафтообразующими организмами [40], а зачастую и важными промысловыми объектами [5]. Масштаб восприятия среды, обусловленный крупными размерами мегабентоса, длительностью жизненных циклов организмов и их высокой подвижностью обусловливает их ландшафтную и фациальную приуроченность — в отличие от макро- и мейобентоса, распределение которого гораздо более гетерогенно и часто определяется мелкомасштабным распределением факторов внутри одного ландшафта. Все эти особенности делают мегафауну удобным объектом при картировании морских акваторий, данные по распределению и составу мегафауны легли в основу многих схем районирования и вертикальной зональности донных сообшеств [6, 8, 30, 38, 45–47].

Вместе с тем получение таких данных достаточно трудоемко, особенно вне глубин, доступных с использованием легководолазного снаряжения. Если в прошлом веке их основу составляла траловая съемка [30, 38, 47], то в настоящее время подавляющее большинство данных по распределению и динамике мегафауны получается благодаря видеонаблюдениям [34, 37, 41]. Обширные фотографические наблюдения за арктической мегафауной были впервые проведены во второй половине XX в. [39]. В исследованиях ИО РАН по проекту "Моря Российской Арктики", видеонаблюдения стали широко применяться после ввода в эксплуатацию БНПА "Видеомодуль" [25]. С его помощью получены первые видеоданные по сообшествам мегабентоса склона моря Лаптевых [7, 31], заливов архипелага Новая Земля [29], западной части Карского моря [10, 18, 48].

В данной работе мы приводим первые данные по видеонаблюдениям в восточной части Карского моря и сравниваем состояние донных сообществ мегабентоса восточной и западной частей моря в 2022 г по данным 89 рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш". Донные экосистемы Карского моря считались достаточно стабильными на протяжении прошлого века [22, 36]. Однако в последнее время, благодаря как климатическим изменениям, связанным с удлинением безледного периода, так и сопутствующей инвазии высокоподвижного крупного донного хишника краба-стригуна *Chionoecetes opilio* [20. 27, 48], наблюдаются существенные перестройки донных сообществ западной части Карского моря и заливов архипелага Новая Земля [24, 26, 31]. Донные сообщества восточной части Карского моря и желоба Воронина исследованы гораздо более фрагментарно, нежели остальные районы Карского моря [3, 6], хотя как ледовые условия, так и биотопическая обстановка (рельеф и характер субстрата) восточной части моря достаточно сильно отличаются от таковых западной и центральной его частей [22, 23, 30]. После появления в Карском море краба-стригуна подробных исследований донных сообществ в этой части моря не было.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования донных сообществ Карского моря с целью оценки их современного состояния были проведены в ходе 89 рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" (сентябрь–октябрь 2022 г.). Было выполнено 12 станций в трех районах моря (рис. 1) — в заливе Благополучия (2 станции), в западной части моря (2 станции), в восточной части моря на разрезе в диапазоне глубин от 1650 до 70 м (8 станций).

Вилеосъемка лна была провелена с помошью буксируемого необитаемого подводного аппарата (БНПА) "Видеомодуль", разработанного и изготовленного специалистами ИО РАН. Оборудование БНПА "Видеомодуль" включает систему управления и передачи данных, что позволяет получать навигационно-привязанные, пространственно-ориентированные и масштабированные изображения дна [1, 25]. Аппарат буксировали на скорости порядка 0.5 узла на высоте от дна 1-1.5 м. На данной высоте средняя ширина кадра может варьировать в диапазоне 1.0-1.3 м, при этом качество картинки остается достаточным для анализа видеоинформации. Длина видеотрека зависела от условий навигации, но обычно составляла порядка 600 м. Обшая протяженность маршрутов БНПА "Видеомодуль" по дну составила 7144 м. Получено и дешифровано 7 часов 22 минуты видеозаписи и 708 подводных фотографий высокого разрешения (табл. 1).

Предварительный учет организмов мегафауны проводили либо методом случайных кадров, либо с помощью визуального учета на всем протяжении трека или на его части. Первый способ



Рис. 1. Карта станций, выполненных в ходе 89 рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш". (а) – расположение станций, (б) – профиль восточного разреза.

Станция	Дата	Координаты начала трека	Диапазон глубин, м	Длина трека, м	Время записи, мин	Площадь покрытия видео, м ²	Количество фотографий
7478	26.09.2022	75° 40.1035 N 063° 41.0908 E	172-176	336	30	403	21
7473	27.09.2022	75° 38.0991 N 063° 37.7094 E	71–54	603	38	724	-
7494	30.09.2022	82° 13.5918 N 078° 29.3749 E	1666—1680	602	45	722	88
7495	30.09.2022	82° 05.0057 N 078° 30.6397 E	448-446	1004	44	1205	88
7498	01.10.2022	80° 53.8674 N 081° 38.7246 E	192–206	602	46	722	73
7500	02.10.2022	79° 44.0646 N 083° 02.3016 E	80-86	601	38	721	77
7501	02.10.2022	79° 15.9779 N 087° 37.8236 E	290-283	601	39	721	72
7502	02.10.2022	78° 36.0713 N 088° 04.6699 E	239–232	402	23	482	43
7503	03.10.2022	78° 00.8646 N 087° 37.3647 E	101-106	601	37	721	67
7505	03.10.2022	76° 58.0687 N 087°40.8157 E	75–72	601	34	721	70
7506	05.10.2022	72° 24.8286 N 065° 29.0439 E	109–113	600	38	720	49
7507	05.10.2022	71° 45.7362 N 065° 46.5077 E	151-158	591	30	709	60
ВСЕГО			54-1680	7144	442	7864	708

Таблица 1. Погружения БНПА "Видеомодуль" в 89 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш"

применялся для учета мелких и многочисленных организмов, в основном офиур. На 30-50 случайно остановленных кадрах трека производили подсчет организмов, площадь каждого кадра пересчитывали с помощью масштабных лазерных указок. Редкие организмы учитывали на всей трансекте или на ее части (не менее 1/3, в разных ее частях), их плотность пересчитывали исходя из средней ширины кадра. Для наиболее мелких и трудно идентифицируемых организмов (таких как офиуры Ophiocten sericeum и Ophiacantha bidentata в совместных поселениях) использовали фотографии с камеры высокого разрешения. Также на станциях были проведены траления с использованием трала Сигсби, что позволяло подтверждать достоверность определений организмов мегафауны. Хотя при описании ландшафтов мы старались учитывать трубкообразующих полихет и ряд других более мелких организмов

(большей частью с помощью фотографий), в анализе были использованы только данные по крупным формам мегафауны, учет которых одинаково репрезентативен на всех видеотреках.

Анализ сходства станций, выделение сообществ и видовых группировок были проведены с помощью методов кластерного анализа с использованием пакета программ PRIMER 7.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Описания исследованных ландшафтов приведены в таблице 2.

В целом можно заметить, что восточный разрез отличается существенным разнообразием ландшафтов, привязанных к разнообразным геоморфологическим структурам дна моря (рис. 2).

РАЗЛИЧИЯ СООБЩЕСТВ МЕГАБЕНТОСА

Станция	Глубина	Характеристики грунта	Фауна
		Восточный разрез	
7494	Нижняя часть склона, 1666—1680 м	Дно рыхлое, ровное, осадок сильно биотурбирован, много нор различно- го размера. Иногда выходы коренной породы, отдельные крупные камни с богатой эпифауной. Массово трубки полихеты <i>Galathowenia</i> spp.	Среди мегабентоса только <i>Ophiopleura</i> borealis (0.2 экз/10 м ²)
7495	Середина склона, 488—446 м	Дно плотное, осадочное покрытие от 80 до 20%, отчетливые следы придонных течений. Большое количество камней и гальки разных размеров, выходы ко- ренных пород. Мегафауна очень богата, большое количество сестонофагов	Доминируют: губки (170 экз/10 м ²), <i>Ophiacantha bidentata</i> (1500 экз/10 м ²), актинии (2.5 экз/10 м ²), <i>Gorgonocephalus arcticus</i> (1.6 экз/10 м ²), <i>Heliometra</i> sp. (0.34 экз/10 м ²), <i>Strongylocentrotus</i> sp. (0.48 экз/10 м ²), <i>Lophaster furcifer</i> (0.40 экз/10 м ²). Регулярно: краб-стригун
7498	Кромка шель- фа, 192—206 м	Осадочное покрытие 100%, дно мягкое, ровное, осадок коричневый, сильно биотурбирован, большое количество следов ползания офиур. На дне плот- ные поселения полихет в трубках сем. Chaetopteridae и Oweniidae, много нор креветок и амфипод	Доминируют: <i>O. bidentata</i> (98.2 экз/10 м ²), <i>O. borealis</i> (17.5 экз/10 м ²), <i>Ophioscolex glacialis</i> (8.3 экз/10 м ²), Gersemia spP. (13.7 экз/10 м ²), полихеты сем. Sabellidae (17 экз/10 м ²). Встречены также: <i>G. arcticus</i> , актинии, <i>Strongylocentrotus</i> sp., <i>Urasterias lincki</i> , <i>Linkia</i> sp., краб-стригун
7500	Вершина мор- ского подня- тия, 80—86 м	Дно гетерогенное, большое количество камней разного размера, выходы поро- ды, дно биотурбировано, встречаются норы разного размера, холмики, следы ползания, трубки полихет	Доминируют: O. bidentata (43 экз/10 м ²), Gersemia spp. (16.8 экз/10 м ²), актинии (1.8/10 м ²), Heliometra sp. (0.7 экз/10 м ²). Встречены также: G. arcticus, U. lincki, Pontaster tenuispinus, O. borealis.
7501	Впадина, 290—283 м.	Осадочное покрытие 100%, ровное очень мягкое дно. Мутность высокая, часть организмов утоплена в грунт, норы не замечены, многочисленные следы ползания офиур.	Доминируют: <i>О. borealis</i> (4.4 экз/10 м ²), <i>Saduria sabini</i> (1.3 экз/10 м ²). Встречены также: краб-стригун
7502	Шельф, 239—232 м	Осадочное покрытие 100%, дно мягкое, илистое, рыхлое, сильно биотурбиро- вано, много следов ползания. Перио- дически скопления нор, приуроченные к плотному грунту и небольшим повы- шениям. Следы оползней. Поселения полихет в трубках. Часть организмов занесено илом	Доминируют: <i>О. bidentata</i> (96 экз/10 м ²), <i>О. borealis</i> (24.9 экз/10 м ²). Регулярно <i>О. glacialis</i> , актинии, креветки, краб-стригун
7503	Шельф, 101—106 м	Осадочное покрытие 100%, дно или- стое, рыхлое, сильно биотурбировано. Изредка отдельные камни. Много сле- дов ползания, большое количество нор разного размера, поселения полихет в трубках	Доминируют: <i>O. bidentata</i> (170 экз/10 м ²), <i>Gersemia</i> spp. (0.97 экз/10 м ²), <i>Heliometra</i> spp. (0.77 экз/10 м ²), <i>G. arcticus</i> (0.51 экз/10 м ²), <i>U. lincki</i> (0.57 экз/10 м ²), <i>O. glacialis</i> (0.4 экз/10 м ²), <i>Lophaster</i> sp. (0.13 экз/10 м ²). Регулярно взрослый краб-стригун
7505	Внутренний шельф, 75—72 м	Осадочное покрытие 100 %, дно волни- стое, мягкое, илистое, рыхлое, сильно биотурбировано. Встречаются оползне- вые формы рельефа, много нор, ракуша	Доминируют: <i>O. bidentata</i> (178 экз/10 м ²), <i>Ophiocten sericeum</i> (192 экз/10 м ²). Регулярно <i>O. borealis</i> (3.3 экз/10 м ²), <i>Strongylocentrotus</i> sp. (0.5 экз/10 м ²), <i>Hymenaster pellucidus</i> (0.29 экз/10 м ²), <i>Gersemia</i> sp. (0.17 экз/10 м ²), <i>Heliometra</i> sp. (0.12 экз/10 м ²)

Таблица 2. Характеристики исследованных донных ландшафтов Карского моря

УДАЛОВ и др.

Таблица 2. Окончание

Станция	Глубина	Характеристики грунта	Фауна							
	Залив Благополучия									
7478	Котловина, 172—176 м	Дно рыхлое, ровное, осадочное покры- тие 100%. Осадок слабо биотурбирован, очень мало следов ползания, отмечены растительные остатки (талломы лами- нарии и красные водоросли)	Доминируют: актинии <i>Hormathia digitata</i> (0.74 экз/10 м ²), краб-стригун (0.82 экз/10 м ²), <i>U. lincki</i> (0.46 экз/10 м ²)							
7473	Порог, 71—54 м	Дно — пологий склон. Осадочное по- крытие 100%. Осадок серый, рыхлый, умеренно биотурбирован, много следов ползания	Доминируют: краб-стригун (4.6 экз/10 м²), <i>Gersemia</i> sp. (0.94 экз/10 м²)							
	Западная часть моря									
7506	109—113 м	Осадочное покрытие 100%, дно мяг- кое, ровное, осадок — коричневый ил, испещрен большим количеством следов ползания. Нор немного, холмики вы- бросов отсутствуют, камней и выходов пород нет	Доминируют: актинии (16 экз/10 м ²), мелкие звезды сем. Asteriidae (3.3 экз/10 м ²). Регулярно <i>O. bidentata</i> (0.5 экз/10 м ²), <i>Gersemia</i> sp. (0.2 экз/10 м ²), крупные крабы-стригуны (0.16 экз/10 м ²)							
7507	151—158 м	Осадочное покрытие 100%, дно мяг- кое, ровное, осадок — коричневый ил, испещрен большим количеством следов ползания	Доминируют: Gersemia spP. (7.6 экз/10 м ²), актинии (8.8 экз/10 м ²), O. bidentata (2.6 экз/10 м ²), краб-стригун (0.95 экз/10 м ²)							



Рис. 2. Характерные фрагменты видеотреков, полученных с помощью БНПА "Видеомодуль".

На дне часто наблюдаются следы гидродинамической активности, высока доля твердых субстратов, выходов коренных пород, камней, гальки. населенных богатой фауной сестонофагов. Дно обычно сильно биотурбировано, отмечено большое количество следов жизнедеятельности организмов, следов ползания, скопления нор, поселений трубкообразующих полихет. Обшая плотность крупных организмов мегафауны здесь достаточно высока, на шельфе она меняется от 4.4 экз/10 м² (в илистой депрессии на глубине 290 м, ст. 7501) до 373 экз/10 м² (70 м, ст. 7505) и составляет в среднем 140 экз/10 м². Станции склона стоят особняком, наибольшей плотностью организмов характеризуется станция средней части склона (490-445 м, ст. 7495) с гетерогенным грунтом и большим количеством сестонофагов, где плотность ор-



Рис. 3. Таксономическая структура мегабентоса в разных районах моря в 2022 г. по видеоданным (данные по численности).

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

ганизмов достигает 1700 экз/10 м². На нижней части склона (1670 м, ст. 7494) крупные формы представлены исключительно офиурой *Ophiopleura borealis* с низкой плотностью (менее 1 экземпляра на 10 м²).

Рассматривая распределение основных таксонов, можно заметить, что среди мегафауны доминируют офиуры, которые на разных станциях составляют от 68 до 100% от общей численности организмов. Распределение массовых видов офиур зависит от типа грунта и глубины, так *Ophiopleura borealis* и *Ophioscolex glacialis* доминируют на илах на глубинах свыше 200 м, *Ophiocten sericeum* отмечен на наиболее мелководной станции 7505 (70 м), а *Ophiacantha bidentata* обильна на смешанных и твердых субстратах во всем диапазоне глубин.

Ландшафты станций западной части моря и залива Благополучия существенно менее разнообразны, отличаются мягкими субстратами, а также меньшей численностью и разнообразием организмов. На станциях западной части моря численность мегафауны составляла около 20 экз/10 м², на станциях залива Благополучия 1.9 и 5.7 экз/10 м². Разнообразие также существенно ниже. Если на шельфовых станциях восточного разреза мы наблюдали 6-12 таксонов на станцию, то в западной части моря и заливе Благополучия эти значения составляли 3-7 таксонов. Доминирующие таксоны также существенно отличаются — в западной части моря по численности доминируют актинии, мягкие кораллы Gersemia sp. и мелкие морские звезды семейства Asteriidae, в заливе Благополучия доминирует краб-стригун Chionoecetes opilio, доля которого по численности составляет 36 и 72% на станциях внутренней котловины и внешнего порога соответственно, субдоминантами являются также актинии, мягкие кораллы Gersemia sp. и звезды семейства Asteriidae, из которых можно отметить крупных особей Urasterias lincki и Icasterias panopla (рис. 3).

Статистический анализ результатов количественных учетов мегафауны на видеотреках также показывает отличия сообществ мегабентоса западной и восточной частей моря (рис. 4).

В восточной части моря мы можем выделить сообщество *Ophiacantha bidentata*, населяющее практически весь шельф и верхнюю часть склона и переходящее на глубинах около 70 м в более мелководное сообщество *Ophiacantha bidentata* — *Ophiocten sericeum*, а при увеличении глубины и заилении в сообщество *Ophiopleura borealis*. В западной части моря и заливе Благополучия ядро сообщества составляют краб-стригун, актинии и морские звезды *Asteriidae gen* sp.



Рис. 4. Сравнительное распределение плотности массовых крупных представителей мегафауны по данным видеоучетов (Shade Plot Analysis). Виды и станции ранжированы в соответствии с положением на дендрограммах, построенных на основе соответствующих индексов сходства (индекс Брея–Кертиса для станций, индекс ассоциаций (Index of association) для видов).

ОБСУЖДЕНИЕ

Если юго-западная часть Карского моря исследована очень подробно и покрыта плотными съемками [11, 15, 22, 36], то по восточной части моря работ существенно меньше. В первую очередь это связано с ледовой обстановкой, затруднявшей на протяжении ХХ в. доступ в эти районы. Наиболее свежие данные о донных сообществах восточной части Карского моря были получены в ходе рейсов ИО РАН в 2013–2015 гг. [6, 32]. Кроме того, в 2019 г. была проведена бентосная съемка прибрежных частей архипелага Северная Земля по программе "Открытый Океан — Архипелаги Арктики" [9], но результаты работы этой экспедиции пока не опубликованы.

Таким образом, данная работа является первым исследованием донных сообществ восточной части Карского моря после вселения в него краба-стригуна. Анализ видеотреков показал, что основную долю организмов здесь составляли иглокожие, среди которых первое место занимали офиуры. Такая картина была в целом характерна для донных сообществ Карского моря на протяжении всего XX века, не зря Карское море было названо "морем офиур", и зональность моря была обусловлена распределением массовых видов иглокожих [30]. Наиболее ярко этот эффект проявляется при исследовании с помощью траловых съемок [2, 6, 12, 13, 30, 45, 46], тогда как при использовании дночерпателей учет этих крупных организмов неадекватен, что и объясняет различия районирования Карского моря в ряде работ [4, 36].

По данным видеонаблюдений наиболее глубокая часть склона (ст. 7494, 1680 м) населена сообществом, где в качестве массовых ландшафтообразующих форм представлены трубкообразующие полихеты семейства Oweniidae (вероятнее всего Galathowenia fragilis). Среди крупных организмов доминирует офиура Ophiopleura borealis. Наиболее свежие опубликованные данные по глубоководной части склона желоба Воронина были получены на сходной глубине (1580–1776 м, ст. 90 и 91а) в 1995 г на НИЛ "Поларштерн", хотя станции были выполнены несколько восточнее. При этом, поскольку данные были получены только с использованием дночерпателя, авторы описывают сообщество этих глубин, как крайне бедное количественно и качественно, с доминированием мелких полихет и амфипод [3].

Начиная с глубины 450 м, с верхней части склона и выше, на погруженном шельфе до глубин 70 м, на протяжении всей трансекты видовой состав мегабентоса достаточно сходен.

Встречаемость и количественное распределение массовых видов определяется типом грунта (наличие/отсутствие твердого субстрата), гидродинамической активностью и глубиной. Так, присутствие твердого субстрата и интенсивная гидродинамика определяют высокое обилие офиvp Ophiacantha bidentata. морских лилий Heliometra sp. и морских ежей Strongylocentrotus sp. С увеличением глубины и доли мягких субстратов повышается обилие Ophiopleura borealis, на верхнем шельфе на небольших глубинах и смешанных субстратах доминирует Ophiocten sericeum. В аккумулятивных депрессиях (ст. 7501) наблюдается сообщество морского таракана Saduria sabini и офиуры Ophiopleura borealis. Таким образом, мы наблюдаем здесь пространственную мозаику мегабентоса, определяемую батиметрической сменой основных доминирующих видов (рис. 4).

Ранее в этом районе были описаны богатые сообщества с доминированием офиур Ophiacantha bidentata и ряда других подвижных сестонофагов [6, 14, 30]. Достаточно большая доля сестонофагов в северных районах, располагающихся на склоне Северной Земли, отмечена также при исследовании желоба Воронина [3]. При этом авторы показывают, что глубины бровки шельфа (порялка 240 м) оказываются очень богатыми количественно и по биомассе превышают биомассу бентоса на шельфе Карского моря в целом, включая его южные районы. Наши данные подтверждают этот факт, самой богатой станцией количественно оказалась станция верхней части склона на глубине 450 м, сообщество мегабентоса на большей части шельфа также можно охарактеризовать как сообщество Ophiacantha bidentata и сестонофагов.

На более глубоких участках с интенсивной седиментацией руководящим видом становится офиура Ophiopleura borealis. Сообщество с ее доминированием было описано в этом районе ранее [3, 6]. При переходе к мелководным участкам шельфа оно сменяется на сообщество Ophiocten sericeum (ст. 7505). Данное сообщество было впервые выделено З.А. Филатовой и Л.А. Зенкевичем [30], которые описали его как преимущественное для всей восточной части моря и оценили его как наиболее богатое видами сообщество Карского моря. Оно отличается высоким видовым разнообразием и имеет многочисленные региональные разновидности. В состав массовых форм мегафауны входят офиура Ophiacantha bidentata и морские звезды *Ctenodiscus crispatus*, *Hymenaster pellucidus*, *Icasterias panopla* и *Pontaster tenuispinus*.

Таким образом, состав доминирующих видов в 2022 г. соответствует данным 2013–2015 гг. [6]. Более того, полученные нами результаты хорошо соотносятся как с данными 1995 г. [3], так и с гораздо более ранними, полученными около 100 лет назад [14, 30]. При этом практически на всех стан-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

циях нами впервые отмечено присутствие единичных взрослых особей краба-стригуна *Chionoecetes opilio*, однако, в отличие от западной части моря, краб-стригун не входит в число доминирующих видов мегабентоса.

Напротив, в западной части моря и в заливе Благополучия в 2022 г. основу мегафауны составляли крабы-стригуны *Chionoecetes opilio*, крупные морские звезды Urasterias lincki, актинии Hormathia digitata и мягкие кораллы Gersemia sp. Это достаточно сильно контрастирует с данными по состоянию мегабентоса как восточной части моря в настояшее время, так и запалной части Карского моря по данным траловых съемок прошлого века и первого десятилетия века нынешнего. Начиная с первых работ по описанию западной и центральной частей Карского моря этот район (за вычетом прибрежных мелководий) характеризовался доминированием офиур. В зависимости от глубины здесь чередовались мегабентосные сообщества с доминированием Ophiopleura borealis и сообщества с преобладанием Ophiocten sericeum — Ophiacantha bidentata [2, 6, 12, 13, 30]. В целом, районирование Карского моря показывало наличие похожих как по составу, так и по основным характеристикам мегабентосных сообществ, занимающих обширные площади на сходных глубинах на всем протяжении Карского моря с запада на восток [2, 6, 11, 22, 30]. Однако, начиная с момента интенсивного вселения краба-стригуна (после 2014–2016 гг.), наблюдаются изменения в сообшествах мегабентоса западной части моря и заливов Новой Земли. в первую очередь связанного с увеличением численности краба-стригуна и уменьшением плотности офиур [24, 26].

Анализ видеотреков 2022 г. подтверждает эту картину. Офиуры, составлявшие в 2014 г до 90% биомассы и численности донных сообществ по данным траловых сборов [26, 31, 32], практически не встречены на видеотреках 2022 г. в западной части моря. Также не были встречены крупные изоподы. Были обнаружены только крупные морские звезды Urasterias lincki, горгонарии Gorgonocephalus arcticus, мягкий коралл Gersemia sp. Кроме того необходимо отметить высокую численность актиний на видеотрансектах 2022 г.

Распределение краба-стригуна по акватории Карского моря довольно неравномерно, и определяется путями вселения, характеристиками окружающей среды и, вероятно, кормовой базой [5, 18]. Оценка плотности поселений краба-стригуна, полученная с помощью пространственной съемки донным промысловым тралом в 2019 г., показала равномерное покрытие поселениями взрослого краба западной части моря с плотностью 100–500 экз/км² [5]. Данные видеонаблюде-

ний 2020 г. показывают среднюю плотность краба в этом районе около 1-2 экз/100 м², наибольшие плотности краба обнаружены в заливе Благополучия (Новая Земля) – 70 экз/100 м², в западном троге желоба Св. Анны, у пролива Карские ворота и v побережья Новой Земли — около 10-20 экз/100 м² [10]. При этом необходимо упомянуть, что по данным видеонаблюдений плотность краба оказывается существенно выше, нежели по результатам тралений [18]. В целом на 2020 г. плошаль, на которую распространился краб-стригун. составляла порядка 179 тыс. км², или около 20% от акватории Карского моря [5]. Падение плотности краба к востоку вероятно связано как с наличием обширных опресненных областей на Объ-Енисейском мелководье. препятствующих распространению личинок, так и с ледовым покровом, который все еще, несмотря на потепление, достаточно долго держится в восточной части моря [16, 21, 23]. Продолжительность ледяного покрова, скорость схода льда определяют начало гидрологической весны, прогрев поверхностных вод, продуктивность, время появления и оседания личинок краба-стригуна [48]. Особенно актуальными подобные различия между восточной и западной частями Карского моря стали в последние несколько десятилетий, когда общее потепление этой части Арктики и более мягкие ледовые условия обеспечили быстрое расселение личинок краба в регионе.

При этом, если в западной части моря в первые годы вселения популяция краба поддерживалась поступлением личиночного пула из Баренцева моря [48], то уже в 2016 г. взрослые половозрелые самки с икрой составляли значительную часть популяции в юго-западной части моря у побережья Ямала, сформировав, очевидно, в этом районе самоподдерживающуюся популяцию [28, 48]. Присутствие большого количества личинок из обоих источников обеспечивает воспроизведение краба в западной части моря, тогда как в восточной части нами не было поймано ни одной крабовой личинки, а на дне были обнаружены только крупные особи, что свидетельствует о донном проникновении краба в эти районы [17].

До вселения краба-стригуна в донных сообществах Карского шельфа практически отсутствовали массовые крупные беспозвоночные высокоподвижные хищники, при этом практически единственным возможным хищником для краба-стригуна в Карском море является сам краб. Спектр пищевых объектов краба-стригуна в Баренцевом и Карском морях включает представителей практически всех основных групп бентоса. Анализ частоты встречаемости пищевых компонентов показал, что наиболее часто в желудках присутствовали двустворчатые моллюски, полихеты, высшие ракообразные, офиуры [19]. Анализ состава пищи в желудках краба-стригуна в заливе Благополучия показал, что этот вид ведет себя как безвыборочный эпи-бентофаг, питающийся растительной пищей и беспозвоночными, с элементами каннибализма. По частоте встречаемости в желудках преобладали офиуры (68.9% и более трети объема виртуального пищевого комка), детрит и растительные остатки, второстепенную роль играли двустворчатые моллюски и полихеты. Крабы-стригуны использовали в пищу почти все массовые и доступные ресурсы макро-эпибентоса, однако питания глубоко зарывающимися видами инфауны (сипункулиды) не отмечено [35]. Видимо, такая интенсивность питания, высокая мобильность краба-стригуна и отсутствие пресса сверху и привели к наблюдаемым изменениям в структуре донных сообществ западной части Карского моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему моменту наши данные демонстрируют существенные изменения сообществ мегабентоса в западной части Карского моря, где они зачастую носят катастрофический характер, и отсутствие подобных изменений в восточной части моря. Вероятно, разнообразие грунтов, активная гидродинамика, близость склона и более интенсивный водообмен с Арктическим бассейном в восточной части моря приводят к увеличению разнообразия, сложности и устойчивости донных сообществ этого района, в противоположность западной части моря и заливам Новой Земли. Так, в более продуктивном Баренцевом море с более сложной видовой и трофической структурой бентоса появление краба не привело к значимым изменениям донных сообществ [19], напротив, краб встроился в уже существующие экосистемы. Кроме того, восточная часть Карского моря пока еще менее подвержена тем климатическим изменениям (температурным, изменениям состояния и динамики ледового покрова), которые способствовали успешному вселению и вспышке численности краба-стригуна в западной части моря. Данные, представленные в настоящей работе, можно считать реперной точкой при дальнейшем изучении динамики популяции краба-стригуна в этом регионе и оценке изменений структуры донных сообществ.

Источники финансирования. Экспедиционные работы, судовые видеонаблюдения, сбор бентосных данных выполнены в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0021). Анализ видеоданных выполнен при поддержке РНФ (проект № 23-17-00156).

341

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Анисимов И.М., Залота А.К., Лесин А.В., Муравья В.О. Особенности исследования биологических и техногенных объектов с использованием глубоководных буксируемых аппаратов // Океанология. 2023. Т. 63. № 5. С. 840–852.
- Анисимова Н.А. Иглокожие южной части Карского моря (по результатам количественных сборов 1993–1994 гг. // Фауна беспозвоночных Карского, Баренцева и Белого морей. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2003. С. 111–130.
- Анисимова Н.А., Фролова Е.А., Любин П.А. и др. Видовой состав и количественное распределение макробентоса в районе желоба Воронина и на прилегающей части континентального склона // Фауна беспозвоночных Карского, Баренцева и Белого морей (информатика, экология, биогеография). Апатиты: Изд. КНЦРАН, 2003. С. 79–91.
- Антипова Т.В., Семенов В.Н. Состав и распределение бентоса юго- западных районов типично морских вод Карского моря // Экология и биоресурсы Карского моря. Апатиты: Изд. КНЦ АН СССР, 1989. С. 127–137.
- 5. Баканев С.В., Павлов В.А. Перспективы промысла краба-стригуна Chionoecetes opilio в Карском море // Вопросы рыболовства. 2020. Т. 21. № 4. С. 478–487.
- Веденин А.А. Донная фауна сибирского сектора Арктики: состав, распределение сообществ, вертикальная зональность: Дис. ... канд. биол. наук. М: ИО РАН, 2017. 214 с.
- Веденин А.А., Галкин С.В. Исследования континентального склона моря Лаптевых с использованием БНПА "Видеомодуль" // Материалы XVI всероссийской научно-технической конференции "Современные методы и средства океанологических исследований" (МСОИ-2019). Т. II. М.: ИД Академии Жуковского, 2019. С. 276–279.
- 8. Виноградова Н.Г. Вертикальное распределение глубоководной донной фауны океана // Труды института океанологии АН СССР. 1958. Т. 27. С. 86–122.
- 9. Гаврило М.В., Спиридонов В.А., Романенко Ф.А. и др. Экспедиции проекта "Открытый Океан" в 2019 году. Сообщение первое: O2A2-2019: Северная Земля // Российские полярные исследования. 2020. Т. 40. № 2. С. 42–46.
- Галкин С.В., Залота А.К., Удалов А.А., Пронин А.А. Оценка плотности популяций краба-вселенца *Chionoecetes opilio* в Карском море с использованием БНПА "Видеомодуль" // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021). М.: ИО РАН, 2021. С. 207–210.
- Галкин С.В. Исследования макробентоса Карского моря в 49-м рейсе НИС "Дмитрий Менделеев" // Бентос высокоширотных районов. М.: ИО РАН, 1998. С. 34–41.

12. Галкин С.В., Веденин А.А., Минин К.В. и др. Макробентос южной части желоба Святой Анны и прилежащих районов Карского Моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 677–686.

- Галкин С.В., Савилова Т.А., Москалев Л.И., Кучерук Н.В. Макробентос Новоземельского желоба // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. С. 982–993.
- Горбунов Г. П. Донное население Новосибирского мелководья и центральной части Северного Ледовитого океана // Труды дрейфующей экспедиции Главсевморпути на ледокольном пароходе "Г. Седов" 1937–1940 гг. М.-Л.: Изд-во Главсевморпути, 1946. С. 30–136.
- 15. Денисенко С.Г. Донная фауна Карского моря: очередные результаты и перспективы исследований // Труды Зоологического института РАН. 2021. Т. 325. № 2. С. 141–142.
- 16. Думанская И.О. Некоторые тенденции в изменении ледовых характеристик арктических морей в XXI веке // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 362. С. 129–154.
- Залота А.К., Удалов А.А., Чикина М.В. и др. Первые находки вселенца краба-стригуна, Chionoecetes opilio (O. Fabricius, 1788) (Decapoda, Oregoniidae), в восточной части Карского моря // Океанология, в печати.
- Залота А.К., Спиридонов В.А., Галкин С.В., Пронин А.А. Популяционная структура краба-вселенца (Chionoecetes opilio) в Карском море (траловые сборы и видеоучет) // Океанология. 2020. Т. 60. № 1. С. 97–103.
- Захаров Д.В., Стрелкова Н.А., Любин П.А., Манушин И.Е. Сообщества макрозообентоса в области распределения краба-стригуна опилио в Баренцевом и Карском морях. В кн.: Краб-стригун опилио *Chionoecetes opilio* в Баренцевом и Карском морях. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2016. С. 59–73.
- 20. Зимина О. Л. Находка краба-стригуна в Карском море // Биол. моря. 2014. Т. 40. № 6. С. 497–499.
- 21. Карклин ВП., Юлин А.В., Шаратунова М.В., Мочнова Л.П. Климатическая изменчивость ледяных массивов Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. Т. 114. № 4. С. 37–46.
- 22. Карское море. Экологический атлас М.: ООО "Арктический научный центр", 2016. 271 с.
- 23. Ледяные образования морей Западной Арктики / Под ред. Е.К. Зубакин. СПб: АНИИ, 2006. 272 с.
- 24. Лепихина П.П., Басин А.Б., Кондарь Д.В. и др. Изменение количественных характеристик макро- и мейобентоса в заливе Благополучия с 2013 по 2020 гг. (Новая Земля, Карское море) // Океанология. 2022. Т. 62. № 2. С. 235–244.
- 25. Пронин А.А. Методика сбора и представления материалов видеосъёмки поверхности дна с помощью необитаемого подводного буксируемого аппарата "Видеомодуль" // Международный жур-

нал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 12 (часть 1). С. 142–147.

- 26. Руднева Е.В., Удалов А.А., Залота А.К., Чикина М.В. Изменения донных сообществ центральной части Карского моря в результате вселения краба-стригуна Chionoecetes opilio // Труды XI Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022" Т. III (IV): Тверь: ООО "ПолиПРЕСС", 2022. С. 320–324.
- 27. Соколов А.М. Интродукция краба-стригуна в Карское море. Пример дальнейшей адаптивной стратегии этого вида в российском секторе Арктики (по результатам исследований ПИНРО в 2013 г.) // Рыбное хозяйство. 2014. № 6. С. 63–67.
- 28. Стрелкова Н.А. Об акклиматизации краба-стригуна опилио в водах Баренцева и Карского морей // Краб-стригун опилио Chionoecetes opilio в Баренцевом и Карском морях. (Ред. Соколов К.М., Павлов В.А., Стрелкова Н.А. [и др.]). Мурманск: ПИНРО, 2016. С. 17–35.
- 29. Удалов А.А., Анисимов И.М., Басин А.Б. и др. Бентос приледниковых частей заливов Новой Земли богаче, чем представлялось ранее новые данные БНПА "Видеомодуль" // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021). Т. П. М.: ИО РАН, 2021. С. 228–231.
- Филатова З.А., Зенкевич Л.А. Количественное распределение донной фауны Карского моря // Труды Всесоюзного Гидробиологического Общества. 1957. Т. 8. С. 3–67.
- 31. Флинт М.В., Анисимов И.М., Арашкевич Е.Г. и др. Экосистемы Карского моря и моря Лаптевых: экспедиционные исследования 2016 и 2018 гг. / ИО РАН. Москва: ИП Ерхова И.М, 2021. 368 с.
- 32. Флинт М.В., Арашкевич Е.Г., Артемьев В.А. и др. Экосистемы морей Сибирской Арктики. Материалы экспедиционных исследований 2015 и 2017 гг. / ИО РАН. М.: АПР, 2018. 232 с.
- Bergmann M., Dannheim J., Bauerfeind E., Klages M. Trophic relationships along a bathymetric gradient at the deep-sea observatory HAUSGARTEN // Deep Res. Part I Oceanogr. Res. PaP. 2009. V. 56. P. 408– 424.
- 34. Buhl-Mortensen L., Ellingsen K.E., Buhl-Mortensen P. et al. Trawling disturbance on megabenthos and sediment in the Barents Sea: chronic effects on density, diversity, and composition // ICES Journal of Marine Science. 2016. V. 73. P. i98–i114.
- Burukovsky R.N., Syomin V.L., Zalota A.K. et al. Food spectra of snow crabs (*Chionoecetes opilio* (O. Fabricius, 1788) (Decapoda, Oregoniidae), nonindigenous species of the Kara sea // Oceanology. 2021. V. 61. P. 964–975.

- Gerasimova A.V., Filippova N.A., Lisitsyna K.N. et al. Current state of macrobenthos in the southwestern Kara Sea // Continental Shelf Research. 2021. V. 224. P. 104452.
- Gutt J., Starmans A. Patchiness of the megabenthos at small scales: ecological conclusions by examples from polar shelves // Polar Biol. 2003. V. 26. P. 276–278.
- Haedrich R.L., Rowe G.T., Polloni P.T. The megabenthic fauna in the deep sea south of New England, USA // Mar. Biol. 1980. V. 57. P. 165–179.
- Hunkins K., Mathieu G., Teeter S., Gill A. The Floor of the Arctic Ocean in Photographs // Arctic. 1970. V. 23. № 3. P. 175–189.
- Morris K.J., Bett B.J., Durden J.M. et al. Landscapescale spatial heterogeneity in phytodetrital cover and megafauna biomass in the abyss links to modest topographic variation // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 1–10.
- Mortensen P.B., Buhl-Mortensen L., Dolan M. et al. Megafaunal diversity associated with marine landscapes of northern Norway: a preliminary assessment // Norwegian Journal of Geology. 2009. V. 89. P. 163–171.
- 42. Piepenburg D., Blackburn T.H.M., von Dorrien C.F. et al. Partitioning of benthic community respiration in the Arctic (northwestern Barents Sea) // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1995. V. 118. P. 199–214.
- 43. *Piepenburg D., Schmid M.K.* A photographic survey of the epibenthic megafauna of the Arctic Laptev Sea shelf: Distribution, abundance, and estimates of biomass and organic carbon demand // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1997. V. 147. P. 63–75.
- Sswat M., Gulliksen B., Menn I. et al. Distribution and composition of the epibenthic megafauna north of Svalbard (Arctic) // Polar Biol. 2015. V. 38. P. 861– 877.
- Vedenin A., Galkin S., Mironov A.N., Gebruk A. Vertical zonation of the Siberian Arctic benthos: bathymetric boundaries from coastal shoals to deep-sea Central Arctic // Peer J. 2021. V. 9. P. 11640. http://doi. org/10.7717/peerj.11640.
- 46. *Vedenin A., Gusky M., Gebruk A. et al.* Spatial distribution of benthic macrofauna in the Central Arctic Ocean // PLoS ONE. 2018. V. 13. № 10. P. e0200121.
- 47. *Vinogradova N.G.* Vertical zonation in the distribution of the deep-sea benthic fauna in the ocean // Deep-Sea Res. 1962. V. 8. C. 245–250.
- Zalota A.K., Spiridonov V.A., Vedenin A.A. Development of snow crab Chionoecetes opilio (Crustacea: Decapoda: Oregonidae) invasion in the Kara Sea // Polar Biology. 2018. http://doi.org/10.1007/s00300-018-2337-y

DIFFERENCES IN MEGABENTHOS COMMUNITIES IN THE EASTERN AND WESTERN PARTS OF THE KARA SEA BASED ON VIDEO OBSERVATIONS

A. A. Udalov[#], I. M. Anisimov, V. O. Muravya, A. V. Lesin, V. Yu. Kuzmin,

A. K. Zalota, and M. V. Chikina

Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia #e-mail: aludal@mail.ru

The first quantitative video survey of the benthic megafauna was carried out on a transect in the eastern part of the Kara Sea from the slope of the Voronin Trough to the upper shelf in the depth range from 1680 to 70 metres. The data were obtained using the TU-V "Videomodule" during the 89th cruise of the R/V "Akademik Mstislav Keldysh" in autumn 2022. It was shown that the megabenthos in this area differs significantly from that of the western part of the sea and Blagopoluchiya Bay (Novaya Zemlya). In the eastern part of the Kara Sea, echinoderms dominated, among which ophiuroids were in the first place, whereas in the western part of the sea and in the Blagopoluchiya Bay, the key component of the megafauna was the snow crab *Chionoecetes opilio*. Single adults of *Ch. opilio* were recorded for the first time at almost all stations in the eastern part of the sea, but, in contrast to the western area, the snow crab has not yet become dominant here and has not influenced the benthic communities.

Keywords: megabenthos, video observations, Kara Sea

——— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ ——

УДК 639.4

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗОСТЕРЫ ВО ВНУТРЕННИХ БУХТАХ ЗАЛИВА ПОСЬЕТА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ГИДРОДИНАМИКИ И ТРАНСПОРТА НАНОСОВ

© 2024 г. С. В. Катрасов^{1, *}, А. Н. Бугаец¹, В. В. Жариков¹, С. М. Краснопеев¹, А. М. Лебедев¹, В. А. Майнулов²

¹Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток, Россия

> ²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия *e-mail: sergey_katrasov@mail.ru Поступила в редакцию 29.06.23 г. После доработки 18.10.23 г. Принята к публикации 16.11.23 г.

С целью объяснения характера пространственного распространения зостеры во внутренних бухтах залива Посьета выполнены численные эксперименты по моделированию гидродинамики и морфодинамических процессов. Гидродинамическое моделирование выполнено помощью модели Delft3D Flow. Для расчета параметров ветрового волнения (направление распространения, длины и высоты волн, придонных орбитальных скоростей) использована спектральная волновая модель SWAN (Simulating WAves Near shore). Расчет перестройки рельефа дна под действием ветровых волн и гидродинамического воздействия приливных и ветровых течений выполнен с помощью программного комплекса Delft3D. Результаты численных экспериментов показали, что динамика прибрежного рельефа дна определяется характером перемещения наносов в береговой зоне под совместным воздействием волн и течений. Сопоставление результатов моделирования с данными о распространении зостеры показало высокую согласованность с модельными расчетами размыва и аккумуляции в береговой зоне.

Ключевые слова: моделирование, Delft3D, морфодинамика, зостера **DOI:** 10.31857/S0030157424020109 **EDN:** RUTHYW

ВВЕДЕНИЕ

Морские травы играют огромную роль как продуценты органического вещества и являются базовым трофическим звеном в экосистемах прибрежных зон [2, 20, 21, 26]. Заросли морской травы Zostera marina являются одним из основных источников первичной пролукции в мелковольях шельфовой зоны. Произрастая на подвижных рыхлых грунтах, поля зостеры стабилизируют их, снижая скорости течения и ослабляя энергию волн [23, 24]. Прибрежные экосистемы морских трав способны фиксировать углекислый газ при фотосинтезе и хранить органический углерод и в биомассе растений, и в донных отложениях. За счет накопления и захоронения органики в осадках морские травы способны влиять на глобальные изменения климата [27]. Для оценок запасов углерода в отдельных акваториях необходимы

данные о занятых морскими травами площадях. Изучение закономерностей распространения, экологии и биологии морских трав, в том числе зостеры, является актуальной задачей управления морскими прибрежными территориями и их развития, а также создания научно-обоснованных методов управления морскими хозяйствами.

В настоящий момент наиболее распространенным методом картографирования, оценки состояния и мониторинга экосистем морских акватории является проведение натурных обследований в сочетании с обработкой данных дистанционного зондирования (ДДЗ). Результаты натурных обследований позволяют сделать достаточно точные выводы о состоянии и плотности проективного покрытия морских трав на момент съемки, однако возможности подобных обследований достаточно ограничены. Кратковременные экспедиционные обследования не могут обеспечить необходимую точность статистических характеристик ограничивающих факторов среды обитания морских трав. Данные дистанционного зондирования могут быть получены с достаточным для целей картографирования и фиксации изменений пространственного распределения морских трав разрешением. В данном случае следует отметить зависимость итогового результата от конкретного типа ДДЗ и алгоритмов их обработки, так как точность оконтуривания и регистрания картографируемых признаков растительности зависят от пространственного и спектрального разрешения исходных снимков [9]. Совместное использование указанных выше данных в рамках различных статистических моделей повышает точность фиксации границ распространения морских трав, однако для объяснения динамики и взаимодействия основных факторов, влияющих на их распространение, этой информации во многих случаях оказывается нелостаточно.

Кроме этого, важными факторами, влияющими на распространение морских трав, является наличие подходящего субстрата и умеренного воздействия волновых и приливных течений [17, 22]. Учет влияния каждого из этих факторов, изучение характера их пространственно-временной изменчивости и эффекта интегрального воздействия остается сложной научной проблемой. В связи с этим актуальной залачей является создание методов районирования прибрежных территорий на основе данных гидрологических и гидробиологических исследований с привлечением результатов численного моделирования, позволяющих объективно учесть динамику физических ограничений (абиотических факторов), влияющих на условия произрастания зостеры.

В данном исследовании для оценки влияния абиотических факторов на характер пространственного распространения зостеры в бухтах Экспедиции и Новгородская (залив Петра Великого, Японское море) с помощью комплекса моделей, входящих в программный пакет Delft3D (https:// www.deltares.nl/en/) [25], выполнены численные эксперименты моделирования гидродинамических и морфодинамических процессов. Для расчета параметров ветрового волнения (направление распространения, длины и высоты волн, придонных орбитальных скоростей) использована спектральная волновая модель SWAN (Simulating WAves Near shore) [18]. Расчет перестройки рельефа дна и транспорта взвешенных наносов под действием ветровых волн и гидродинамического воздействия прилива выполнен с помощью модуля морфодинамики Delft-MOR [30]. Выполнено сопоставление пространственного распространения зостеры по данным литературных источни-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

ков, натурных обследований и ДДЗ с модельными расчетами размыва и аккумуляции в береговой зоне.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования включает внутренние бухты залива Посьета — бухты Экспедиции и Новгородскую (рис. 1). Бухта Экспедиции расположена к северо-западу от косы Назимова. Южным входным мысом бухты является мыс Назимова, а северным — мыс Шелеха, представляющий собой южную оконечность Новгородского полуострова. Площадь бухты составляет 94.5 км², средняя глубина — 3 м [10]. Дно бухты в основном покрыто мелкоалевритовыми илами, образованными в результате выноса речных наносов р. Туманной (площадь водосбора ~33 тыс. км²) в период послеледниковой трансгрессии, когда она несла свои воды в бухту Экспедиции [15]. Характерными элементами рельефа дна являются рифы биогенного происхождения (устричные банки). Они локально располагаются среди илистой равнины, образуя целые системы рифовых построек высотой от 0.4 до 6.0 м. Общий фон осадков в береговой зоне образован мелкими песками, в центральной части доминируют илы, вокруг мысов залегают гравийно-галечные отложения [11, 12]. Конфигурация береговой линии и подводные возвышения в центральной части бухты создают сложную схему течений, состоящую из квазистационарных циклонических и антициклонических циркуляций.

Вход в бухту Новгородская находится напротив оконечности косы Назимова, между бухтами Рейд Паллада и Экспедиции (рис. 1). Общая площадь бухты 32.5 км². На северном берегу бухты между мысом Шелеха и мысом Усольцева расположен морской порт Посьет. Длина бухты около 12 км, ширина в узкой западной части 1–1.5 км, средние глубины около 10 м. В восточной оконечности она округло расширяется до 4 км, средняя глубина не превышает 3 м, берег вершины бухты образован узким, низким, сложенным из валунов перешейком, который соединяет полуостров Краббе с материком.

Климат в районе исследований умеренный муссонный, зимой преобладают северные ветра, обуславливающие холодную, ясную погоду, в теплый период года преобладают южные ветра с Тихого океана. Среднемесячные скорости ветра зимой составляют 4–6 м/с, летом 3–4 м/с. В теплый период года наблюдается 10–13 дней с сильным (>15 м/с) ветром. Прозрачность и цвет воды заметно меняются от открытой части залива к внутренним бухтам. Летом прозрачность вод в открытой части колеблется в пределах 7.0–



Рис. 1. Район исследования — батиметрия внутренних бухт зал. Посьет — Рейд Паллада, Экспедиция и Новогородская, устричные банки, точки полевого обследования плотности зарослей зостеры.

16.0 м, в б. Рейд Паллада — 2.5–10.0 м, в закрытых мелководных бухтах — 1.5–4.0 м [6, 7].

Приливы имеют неправильный полусуточный период, средняя величина составляет 0.2 м, максимальная — 0.7 м. Скорости приливных течений составляют 0.05-0.13 м/с, в проливах 0.35-0.40 м/с. Бухты Экспедиции и Новгородская сообщаются с открытой частью залива (б. Рейд Паллада) через узкий пролив, сформированный косой Назимова, водообмен через пролив сильно ограничен и зависит, главным образом, от мощности поступающего с северо-востока потока, воды которого проникают в систему внутренних бухт вдоль п-ова Краббе и питают циклонический круговорот в б. Рейд Паллада. Во внутренних бухтах наблюдается четко выраженный реверсивный характер движения вод, зачастую охватывающий весь профиль пролива в узкостях бухт. Средние скорости течений в бухтах не превышают 0.05 м/с, в проливах — до 0.05-0.14 м/с [7, 13].

Волновые и дрейфовые потоки возникают под действием ветров более 10 м/с, в мелководной части бухт они могут охватывать всю толщу вод. Средние скорости ветровых течений составляют 0.15–0.20 м/с. Разгон волн имеет наибольшую протяженность при ветрах южных и северных направлений, поэтому максимальные элементы ветровых волн, как правило, наблюдаются в теплое время года [7]. Максимальную повторяемость (до 97%) имеют волны высотой 0.25–0.75 м.

Продукционные характеристики лугов зостеры [2, 5], пространственное распределение доминирующих видов растительности и их роль в экосистеме залива Посьета [3, 4] детально изучались в серии работ сотрудников Института биологии моря ДВО РАН. Видами-эдификаторами подводных лугов являются Zostera marina и Z. nana. В зарослях морских трав встречается множество видов водорослей — Sargassum pallidum, Laminaria cichorioides, Ulva fenestrata, Ceramium kondoi, Tichocarpus crinitus, Desmarestia viridis, Cladophora stimpsonii Codium fragile, Ptilota filicina и др.

В бухте Новгородской доминирующим видом растительности является Z. marina. На ее заросли, покрывающие около половины всей площади дна, приходится более 90% общей биомассы водной растительности бухты. В бухте Экспедиции поля Z. marina и Z. nana занимают 14.5% площади дна, на эти виды приходится 63 и 25% общей растительной биомассы. В бухте Экспедиции наблюдается так называемый «бордюрный» тип зарастания — водная растительность развивается главным образом в области верхней сублиторали, образуя полосу переменной ширины вдоль берега. Глубина распространения зостеры находится в интервале от 1 до 4 м. В бухте Новгородской зостера полностью покрывает дно мелководной восточной части (рис. 1) [4].

В августе 2021 г. специалистами ТИГ ДВО РАН выполнено обследование дна б. Экспедиции с помощью эхолота Garmin echoMAP 50dv и ка-

бельной видеокамеры BestWill Cr110-7A. Координаты эхолотных промеров и точек погружения видеокамеры, расположение которых приведено на (рис. 1), определялись в геодезической системе WGS-84. В каждой точке погружения камеры отмечалось присутствие или отсутствие морских трав, площадь проективного покрытия определялась по отношению плошади занятой зарослями к общей площади обзора камеры. Полученные данные промеров использованы при построении цифровой модели рельефа (ЦМР), сведения о распределении и проективном покрытии дна зарослями применялись для определения пространственного распределения морских трав с помошью экспертного лешифрирования спутниковых снимков Sentinel-2, полученных в период отсутствия облачности 01-09.09.2021 (L1C_T52TFN_A023438 20210901T020650 (01.09), L1C_T52TFN_A023481_20210904T021559 (04.09), L1C_T52TFN_A032418_20210906T021027 (06.09) и L1C T52TFN А032461 20210909T021603 (09.09)). Спутниковые снимки Sentinel-2 имеют фиолетовый канал, специально предназначенный для изучения прибрежных вод до глубины 10 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве методической основы исследования использован интегрированный пакет программного обеспечения Delft3D, включающий объединенные общим интерфейсом модели течений (Delft3D-Flow), поверхностного волнения (Delft3D-Wave) и морфодинамических процессов (Delft-MOR), позволяющий таким образом рассчитывать эрозию, транспорт и седиментацию набора различных фракций наносов под воздействием приливных и ветро-волновых течений.

Delft3D-Flow Гидродинамический модуль предназначен для 2D-3D-моделирования нестационарных потоков, возникающих в результате приливных и метеорологических факторов. Результаты расчетов Delft3D-Flow используются во всех остальных программных блоках Delft3D, обмен результатами вычислений производится с помощью коммуникационного файла. При моделировании взаимодействия ветрового волнения и течений динамическая связь обеспечивается волновым модулем (Delft3D-WAVE), при морфодинамическом моделировании гидродинамический модуль интегрирован с волновым модулем, модуль седиментации и эрозии — с морфодинамическим.

Delft3D-Wave — программный пакет моделирования ветрового волнения, реализован на базе спектральной ветро-волновой модели третьего

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

поколения SWAN (Simulating WAves Nearshore Model) [18]. SWAN учитывает волновые процессы, формирующиеся под влиянием ветра, гидродинамических факторов и батиметрии, диссипацию волновой энергии, придонное трение, обрушение волн и нелинейные волновые взаимодействия. Модуль расчета морфолинамики Delft-MOR [30] позволяет провести моделирование транспорта отложений с использованием данных численного решения трехмерных уравнений адвекции-диффузии (баланса массы) взвеси. локальных скоростей течений и вихревой диффузии, батиметрии района исследования и типа донных отложений (песок или ил). Моделируется транспорт взвешенных и донных (связанных и несвязанных) отложений.

В качестве информации о батиметрии для построения цифровой модели рельефа дна района исследования использованы отметки глубин и изобаты, оцифрованные с навигационных карт: адм. № 62071, 63000, 63002, 65000, 65004, 68003, 68004, 68006, 68012, 68025, 68036. Программными средствами Delft3d (RGFGRID) для акватории района исследования была сгенерирована прямолинейная расчетная сетка разрешением 30 м (482 × 280 расчетных ячеек). Вертикальное разрешение сетки составляет 3 о-слоя, границы которых установлены в 10% от поверхности и от дна. На открытой границе в б. Рейд Паллада заданы параметры гармонических постоянных прилива (табл. 1) по данным поста "Бухта Постовая" [8, 14]. В табл. 1 используются следующие обозначения волн: M2 – главная лунная полусуточная; S2 – главная солнечная полусуточная; N2 – большая лунная эллиптическая полусуточная; К2 – лунно-солнечная деклинационная полусуточная; К1 – лунно-солнечная деклинационная суточная; О1 – главная лунная суточная; Р1 – главная солнечная суточная; Q1 – большая лунная эллиптическая суточная, М4 – четверть суточная лунная мелководная, MS4 – четверть суточная лунно-солнечная мелководная, М6 – одна шестая суточная лунно-мелководная. Плотность морской воды на открытой границе принята 1025 кг/м³. Соленость на открытой границе задана по материалам [14] как постоянные по глубине значения для летнего сезона 32.5 PSU. Расчетный шаг моделирования 30 с.

Начальные условия для численного эксперимента были сформулированы следующим образом. Нижняя граница задана в виде двух равномерно распределенных по акватории района исследования слоев — нижний слой песка и верхний слой ила толщиной 20 и 5 см соответственно. Средний диаметр и гидравлическая крупность для песка составляют 0.1 мм и 0.01 м/с, для илистых грунтов 0.025 мм и 0.00005 м/с соответственно [16]. Моделирование морфодинамики выпол-

Параметр	M2	S2	N2	K2	K1	01	P1	Q1	M4	MS4	M6
Н, м	0.076	0.033	0.018	0.009	0.056	0.049	0.019	0.01	0.003	0.002	0.001
g°	98	137	74	136	5	328	2	309	47	110	326

Таблица 1. Гармонические постоянные приливов б. Постовая (*H* – амплитуда, *g* – фаза)

нено при установившихся режимах волнения, сформированных стационарными однородными по пространству ветрами четырех основных (N, S, E и W) румбов. Для минимизации влияния начальных условий на результаты расчетов волновой и морфодинамической модели использован 10-дневный период стабилизации модели при средней для района исследований скорости ветра равной 5 м/с и затем расчеты выполнялись для скоростей ветра 15 м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования выведены с часовым интервалом. По данным моделирования приливная ширкуляция вод в бухтах Новгоролская и Экспедиции формируется под влиянием неправильного полусуточного прилива (рис. 2). Приливная волна из залива Петра Великого проникает во внутренние бухты через проход между мысом Назимова и мысом Астафьева, разделяюшим акватории б. Рейл Паллала и б. Новгоролская и Экспедиции. Приливо-отливные течения носят реверсивный характер, формируя три локальных ветви: кутовая часть бухты Новгородская — бухта Рейд Паллада, северо-восточная кутовая часть бухты Экспедиции — бухта Рейд Паллада и северо-западная часть бухты Экспедиции — бухта Рейл Паллада. Основными факторами. определяющими структуру течений, являются рельеф дна (в том числе расположение устричных банок) и фаза приливо-отливных колебаний.

В прилив, периоды между высокой полной и низкой малой водой, а также между низкой полной и высокой малой водой, формируются струи течений направленные из б. Рейд Паллада к северному побережью б. Экспедиции и кутовой части б. Новгородской. В б. Экспедиции основными особенностями циркуляции является формирование двух потоков, имеющих направления вдоль восточного берега, минуя кутовую часть и устье р. Гладкой, с формированием циклонической циркуляции в районе устричных банок восточнее м. Топкого, далее вдоль северного берега бухты до устья р. Шукановки и вдоль южного и юго-восточного побережья, захватывая центральную часть бухты, образуя циклоническую циркуляцию севернее м. Низкого, до м. Дельта на северном побережье бухты. В б. Новгородской поток направлен в сторону кутовой части с формированием в ней циклонической циркуляции.

Во время отлива, в периоды между высокой полной и низкой малой водой, а также между низкой полной и высокой малой водой, формируются течения, направленные к акватории б. Рейд Паллада. В б. Экспедиции основной особенностью ширкулящии является направленность потоков к центру бухты, с формированием антициклонических циркуляций в районах устричных банок восточнее м. Андреева, западнее м. Дельта и м. Низкий. их слиянием и дальнейшим движением основного потока в б. Рейд Паллада вдоль южного побережья п-ва Краббе и м. Шелеха. В б. Новгородской в кутовой части формируется антициклоническая циркуляция с дальнейшим движением потока в сторону б. Рейд Паллада вдоль главной оси бухты. Максимальные модельные скорости горизонтальных течений в среднем и придонном слое, вызванные приливом, нахолятся в интервале 0.02–0.05 м/с. При ветре 5 м/с значения скоростей течения достигают значений 0.06-0.08 м/с. При штормовых ветрах западных и восточных румбов, обеспечивающих максимальный разгон, придонные горизонтальные скорости могут достичь 0.1 м/с. На мелководных прибрежных участках и над банками влияние приливных и ветровых течений может обеспечивать лишь слабый поступательный транспорт взвеси илистых фракций. Приливные и ветровые течения практически не инициируют процессы размыва и аккумуляции наносов в области литорали.

Ветровое волнение в бухте Экспедиции формируется под влиянием ветра, рельефа дна и конфигурации береговой черты. На большей части акватории направление волнения совпадает



Рис. 2. Схема приливо-отливных течений в бухтах Экспедиции и Новгородская по результатам моделирования.

Nº 2

2024

с направлением ветра, на мелководье вследствие рефракции, направление распространения волн определяется очертаниями береговой линии. При ветрах северо-восточного и юго-западных направлений разгоны волн ограничены, при южных и северных — разгон волн имеет наибольшую протяженность. Максимальные значения высоты волны при средней скорости ветра 5 м/с в центральной части бухты составляют 0.35-0.40 м. На остальной акватории высота волны изменяется в пределах от 0.15 до 0.30 м в направлении от берега к центру бухты. Характерной особенностью поля ветрового волнения в б. Экспедишии является существенное влияние батиметрии на распределение волновых характеристик. Волна развивается в направлении к центральной части бухты, где частично разрушается, проходя через банки, и продолжает движение к подветренному берегу. При скорости ветра 15 м/с наибольшие высоты волн составили 0.8-0.9 м. скорости ветровых течений — 1.1-1.2 м/с соответственно. В бухте Новогородской ветровое волнение имеет однородный характер, максимально высота волн в численном эксперименте при скорости ветра 5 м/с составила 0.25 м, скорости ветровых течений 0.2-0.4 м/с, при скорости ветра 15 м/с максимальная высота волн составила 0.63 м, скорость ветровых течений — 0.98 м/с соответственно.

Отрыв частиц грунта и транспорт взвеси может осуществляться только при совместном воздействии течений и вызванных штормовыми ветрами волн. Орбитальные скорости волн, вызванных средними скоростями ветра (5 м/с), уже способны поднимать илистые фракции, однако в результате смены направлений приливных течений за полупериод (12 ч) поле взвеси не успевает существенно модифицироваться и взвешенные наносы оседают, не покидая пределов расчетных ячеек. Максимальное количество взвеси формируется в подветренных районах при штормовых ветрах (15 м/с) западного направления, обеспечивающих максимальных разгон волн. В течение первого часа развития ветрового волнения в прибрежной части концентрации взвеси могут достигать значений 300-400 кг/м³. Движение наносов определяется главным образом интенсивностью волновой эрозии и переноса взвешенных частиц ветровыми и приливными циркуляционными течениями. Орбитальные волновые скорости обеспечивают отрыв и перемещение частиц в верхние слои, далее взвешенные наносы перераспределяются под воздействием ветровых и приливных течений от прибрежной зоны к центру бухт, где концентрация твердых частиц достигает значений 200-250 кг/м3. После завершения ветрового воздействия полное осаждение взвеси по всей акватории бухт Экспедиции и Новогородской до состояния прозрачной воды происходит в течении 10 суток с характером снижения

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

концентраций близким к экспоненциальному: на 3 сутки до 100–120 кг/м³, на 5 сутки 10–20 кг/м³ и ~ 0.02 кг/м³ на 12 сутки эксперимента.

Сильные штормы вызывают перестройку рельефа береговой отмели и литорали. На рис. 4 представлены результирующие леформации расположенных вдоль прибрежной зоны контрольных поперечных профилей (рис. 3), на 10-е сутки каждого численного эксперимента, расположенные по периметру б. Экспедиции. В течение численных экспериментов поперечные профили берега в результате воздействия штормовых волн за короткое время в основном приобрели S-образный профиль, основная масса смытого в береговой зоне материала перенесена по направлению к центру бухты. В зоне распространения устричных банок и частично в прибрежной полосе при штормовых ветрах западного и юго-западного направлений слой ила был полностью смыт, профили береговых склонов практически достигли не размываемой границы модели (рис. 4). Поскольку корни зостеры обычно располагаются в грунте до глубины 20-30 см, в некоторых областях литорали могут создаваться неблагоприятные условия — корни размыты, и трава вырвана волновым воздействием. В то же время в зоне активного волнового воздействия могут быть выделены зоны, которые не претерпели значимых изменений отметок дна, а также зоны, в которых в результате воздействия течений и волн, вызванных переменными направлениями ветра, может возникать относительное динамическое равновесие берегового профиля. На этих участках развитые растения зостеры способны выжить, а молодые побеги и семена могут быть занесены илом и погибнуть. Зоны постоянной аккумуляции материала можно интерпретировать как неблагоприятные для условий произрастания зостеры.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам всех численных экспериментов, расчетные горизонтальные скорости течения находятся в пределах оптимальных для произрастания морских трав, в том числе зостеры [17]. Они и не могут существенно повлиять на стебли растений, а также вызвать размыв грунта и обнажение корней. По данным [19] в прибрежной зоне на глубинах до 10 м ограниченность или отсутствие освещенности за дневной период приводит к гибели зостеры приблизительно на 30-е сутки. Поскольку повторяемость штормовых ветров в теплый период года соответствует частоте раз в 10 дней [6, 7], можно заключить, что световой режим также не является лимитирующим фактором выживания зостеры в исследуемых бухтах.



Рис. 3. Зоны произрастания зостеры во внутренних бухтах зал. Посьет по данным: 1) работы [3]; дешифрирования ДДЗ — 2) плотные и 3) разряженные заросли; полевого обследования (степень покрытия дна водорослями к общей площади обзора камеры): единичные (<10%); разряженные (>10%) и плотные (до 100%). Контрольные поперечные профили обозначены цифрами. Границы зон 4) устойчивого и 5) потенциально-возможного (максимального распространения) произрастания зостеры выделенные на основе результатов моделирования.

Для объяснения положения границ распространения зостеры, на основе полученных в результате всех численных экспериментов данных о перераспределении наносов в прибрежной зоне, были построены пространственные распределения минимальных и максимальных отметок дна. На результирующих покрытиях выделены зоны отсутствия слоя ила. Минимальные отметки дна верхней сублиторали, на которых отсутствует слой ила, достаточно хорошо соответствуют границам распространения зостеры по данным работы [4] и дешифрированию ДДЗ (рис. 4). Эти границы можно интерпретировать как максимальные границы, в которых зостера может образовывать подводные луга. Выделенные в поле максимальных модельных отметок дна зоны отсутствия слоя ила следует интерпретировать как области, наиболее благоприятные для формирования зарослей зостеры, где морская трава не подвержена негативному воздействию морфодинамических процессов. Над устричными банками по результатам моделирования оба слоя (и ила, и песка) практически полностью смыты, поэтому зостера там жить не может. Ниже глубины 3-4 метров заросли зостеры отсутствуют. Семена зостеры, вынесенные под воздействием гидродинамических факторов из береговой области в центральную часть бухты, при опускании на дно (обычно в конце зимнего периода) попадают в придонный взвешенный слой ила и коллоидных фракций, где погибают. Фактически это исключает возможность колонизации центральной части бухты Экспедиции морскими травами.

При визуальном сопоставлении, большая часть точек обследования (рис. 4), где проективное покрытие зостеры больше нуля, достаточно хорошо соответствует области полностью смытого слоя ила и орбитальных волновых скоростей >0.3-0.35 м/с. В этой зоне наблюдаются vсловия, при которых корни зостеры могут закрепляться в донном грунте, и сама трава не погибнет погребенная под слоем перемещенного вниз по профилю берега материала. Кроме эстуария р. Гладкой (площадь водосбора 458 км²), точки плотного (100%) покрытия хорошо соответствуют выделенным в результате расчетов наиболее благоприятным для формирования зарослей зостеры прибрежным областям. Точки обследования, соответствующие категориям разряженного (>10%) и единичного (<10%) покрытия зостеры, расположены ближе к расчетным границам максимального распространения зостеры.

В кутовой части б. Экспедиции, в районе впадения р. Гладкой, полученные закономерности могут нарушаться в результате выноса терригенного материала реками, который не учтен в численном эксперименте. Также существенное влияние на результаты расчетов может оказывать точность цифровой модели рельефа дна. Дополнительно следует отметить, что данные литературных источников, натурного обследования и спутниковых снимков дают несколько разные сведения о присутствии зостеры для объектов исследования. Это может быть связано с большой гетерогенностью плотности размещения зостеры даже в пределах одного сообщества, а также с межгодовой изменчивостью гидро-



Рис. 4. Изменение отметок дна (м) в контрольных поперечных профилях на конец каждого численного эксперимента. Номера разрезов соответствуют обозначениям на (рис. 3).

метеорологических условий. Изменение площадей и местоположения полей зостеры, локальное исчезновение зарослей и повторная колонизация участков рассматриваются как часть популяционной стратегии этого вида [29], позволяющей зостере восстанавливаться после периодического воздействия разрушающих факторов [28].

При сильных штормах донный ил может быть снова переведен во взвешенное состояние, вынесен к поверхности и включен в систему прибрежной циркуляции главным образом в области литорали и поверхности устричных банок, для которых основным источником поступления илистого материала является твердый сток впадающих в бухты рек. Согласно региональным данным [1], для рек юга Приморского края суточный модуль смыва почвы со склонов водосбора в период прохождения летних паводков может составлять 6.6 т · сут./км² и более. Основная масса смытого материала приносится в б. Экспедиции, водосбор которой составляет ~1200 км². Под воздействием ветро-волновых течений взвешенные наносы перераспределяются по акватории, частично оседают и частично выносятся стоково-приливными

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

течениями в бухты Новгородская и Рейд Паллада. Значительно меньше материала смывается с водосбора б. Новогородской, площадь которого составляет ~50 км², кроме этого, снижение скоростей течений в средней, сильно вытянутой, части б. Новогородская препятствует проникновению взвешенных наносов из б. Экспедиции в ее кутовую часть. Волновое воздействие на литораль в кутовой части незначительное, баланс донных отложений остается относительно постоянным, таким образом, зостера в б. Новогородской не испытывает негативного воздействия от размыва или аккумуляции иловых фракций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании выполнено моделирование морфодинамических процессов во внутренних бухтах залива Посьета с целью определения мест размыва и аккумуляции в результате совместного волнового воздействия и циркуляции приливо-отливных течений, а также использования этих данных с целью объяснения пространственного характера распространения зостеры. Показано, что в резуль-

КАТРАСОВ и др.

тате воздействия волнения, вызванного штормовыми ветрами (15 м/с) четырех основных румбов, в береговой зоне происходит размыв донных отложений и формирование значительного количества взвеси ила и песка, которая под воздействием циркуляционных течений перемещается за пределы прибрежной зоны. Сопоставление данных о распространении зостеры — литературных источников, дешифровки ДДЗ и полевого обследования показало высокую согласованность с результатами моделирования процессов размыва и аккумуляции илистых фракций. Расхождения между результатами расчетов и данными наблюдений прежде всего связаны с точностью цифровой модели рельефа в области литорали. принятыми в численном эксперименте упрощениями относительно начальных условий распределения донных отложений, характера метеорологического воздействия (однородное поле ветра) и большой гетерогенностью плотности размещения зостеры. Зона произрастания зостеры не остается постоянной и может изменяться в зависимости от метеорологических условий каждого года. Границы зон выживаемости и роста могут зависеть от степени развития растений и результирующего баланса наносов. Перспективы развития данного направления исследований связаны с необходимостью использования в моделях более детальных данных о рельефе в прибрежной зоне, распределении донных отложений и дополнительных полевых обследованиях, межгодовой динамики распространения сообществ зостеры.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБУН Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук (тема государственного задания FWMW-2024-0003). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаец А.Н., Лупаков С.Ю., Пшеничникова Н.Ф., Краснопеев С.М. Моделирование стока взвешенных наносов по данным Приморской воднобалансовой станции // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 28–38.

- 2. Вышкварцев Д.И. Особенности продукционных процессов в мелководных бухтах зал. Посьета (Японское море): Дис. ... канд. биол.наук, Владивосток: Ин-т биологии моря, 1979. 251 с.
- Вышкварцев Д.И. Физико-географическая и гидрохимическая характеристики мелководных бухт залива Посьета // Гидробиологические исследования заливов и бухт Приморья. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 4–11.
- Вышкварцев Д.И., Пешеходько В.М. Картирование доминирующих видов водной растительности и анализ их роли в экосистеме мелководных бухт залива Посьета Японского моря // Подводные гидробиологические исследования. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 120–129.
- 5. Вышкварцев Д.И., Пешеходько В.М. Продукционный потенциал доминирующих видов водной растительности в мелководных бухтах залива Посьета (Японское море) // Биологические науки. 1987. № 11. С. 90–95.
- Гидрометеорологические условия шельфовой зоны Японского моря // Тр. ДВНИИГМИ. 1976. Вып. 27. 794 с.
- Григорьева Н.И. Залив Посьета: физико-географическая характеристика, климат, гидрологический режим // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря. Владивосток: Изд. дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. 440 с.
- 8. *Деева Р.А.* Каталог гармонических и негармонических постоянных приливов отечественных вод морей Дальнего Востока. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 249 с.
- 9. Жариков В.В., Базаров К.Ю., Егидарев Е.Г., Лебедев А.М. Использование данных Landsat для картографирования высшей водной растительности дальневосточного морского заповедника // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 521–531.
- Лоция северо-западного берега Японского моря от реки Туманная до мыса Белкина. ГУНО. 1984. 316 с.
- 11. *Мануйлов В.А.* Подводные ландшафты залива Петра Великого. Владивосток: Изд-во Дальневосточного университета, 1990. 168 с.
- Мануйлов В.А. Формирование биогенных форм подводного рельефа в береговой зоне Южного Приморья (Японское море) // XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования — в практику берегопользования. Сб. мат. Всеросс. конф. с международным участием. Калининград, 2022. С. 66–68.
- Новожилов А.В., Григорьева Н.И., Вышкварцев Д.И., Лебедев Е.Б. Течения и горизонтальная турбулентность в бухтах залива Посьета (Японское море) // Рациональное использование биоресурсов Тихого океана: тез. докл. Владивосток: ТИНРО, 1991. С. 61–63.
- 14. Супранович Т.И., Якунин Л.П. Гидрология залива Петра Великого // Труды ДВНИГМИ. 1976. Вып. 22. С. 104–105.

- 15. Хериберг Л.Б., Михайлик Е.В., Пушкарь В.С., Вачаев Б.И. Строение, вещественный состав илистой толщи шельфа юга Приморья и перспективы ее освоения // Тихоокеанская геология. 2013.Т. 32. № 2. С. 90–99.
- 16. Шапиро Г.И., Акивис Т.М., Пыхов Н.В. Анциферов С.М. Перенос мелкодисперсного осадочного материала мезомасштабными течениями в шельфово-склоновой зоне моря // Океанология. 2000. Т. 40. № 3. С. 333–339.
- Boer W.F. Seagrass-sediment interactions, positive feedbacks and critical thresholds for occurrence: a review // Hydrobiologia. 2007. V. 591, P. 5–24. http:// doi.org/10.1007/s10750-007-0780-9
- Booij N., Ris R. Holthuijsen L. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 7649–7656.
- Dennison W.C., Alberte R.S. Role of daily light period in the depth distribution of Zostera marina (eelgrass) // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1985. V. 25. P. 51–61. http:// doi.org/10.3354/meps025051
- Fourqurean J.W., Duarte C.M., Kennedy H. et al. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock // Nature Geoscience. 2012. V. 5. Iss. 7. P. 505–509.
- Harrison P.G., Mann K.H. Detritus formation from eelgrass (Zostera marina L.): the relative effects of fragmentation, leaching, and decay // Limnol. Oceanog. 1976. V. 20. Iss. 6. P. 924–934. http://doi.org/10.4319/ lo.1975.20.6.0924
- Hirst A.J., Giri K., Ball D., Lee R.S. Determination of the physical drivers of Zostera seagrass distribution using a spatial autoregressive lag model // Mar. Fresh. Res. 2017. V. 68. P. 1752–1763.

- Infantes E., Orfila A., Simarro G. et al. Effect of a seagrass (Posidonia oceanica) meadow on wave propagation // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2012. V. 456. P. 63–72. http://doi.org/10.3354/meps09754
- Lei J., Nepf H. Wave damping by flexible vegetation: connecting individual blade dynamics to the meadow scale // Coast. Eng. 2019. V. 147. P. 138–148. http:// doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.01.008
- 25. Lesser G.R., Roelvink J.A., van Kestera J.A.T.M., Stelling G.S. Development and validation of a three-dimensional morphological model // Coastal Engineering. 2004. V. 51. № 8–9. P. 883–915.
- Röhr M.E., Holmer M., Baum J.K. et al. Blue carbon storage capacity of temperate eelgrass (Zostera marina) meadows // Global Biogeochemical Cycles. 2018. V. 32. P. 1457–1475. http://doi.org/10.1029/ 2018GB005941
- Stankovic M., Hayashizaki K.-I., Tuntiprapas P. et al. Two decades of seagrass area change: organic carbon sources and stock // Marine Pollution Bulletin. 2021. V. 163. P. 111913. http://doi.org/10.1016/j. marpolbul.2020.111913
- Tremolieres M. Plant response strategies to stress and disturbance: the case of aquatic plants // Journal of Bioscience. 2004. V. 29. P. 461–470.
- 29. Van Katwijk M.M., Bos A.R., de Jonge V.N. et al. Guidelines for seagrass restoration: importance of habitat selection and donor population, spreading of risks, and ecosystem engineering effects // Marine Pollution Bulletin. 2009. V. 58. P. 179–188.
- Van Ormondt M. The Teignmouth model, Validation and evaluation of Delft3D-MOR with COAST3D Pilot campaign data, WL. Delft Hydraulics report Z2394.20, February 2000.

ASSESSMENT OF THE ABIOTIC FACTORS INFLUENCE ON THE DISTRIBUTION OF ZOSTERA IN THE INTERNAL BAYS OF POSYET GULF BASED ON THE RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION

S. V. Katrasov^{*a*, #}, A. N. Bugaets^{*a*}, V. V. Zharikov^{*a*}, S. M. Krasnopeev^{*a*}, A. M. Lebedev^{*a*}, and V. A. Mainulov^{*b*}

^aPacific Geographical Institute, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia ^bFar Eastern Federal University, Vladivostok, Russia [#]e-mail: sergey katrasov@mail.ru

In order to explain the spatial nature of the distribution of eelgrass in the inner bays of Posyet Bay, numerical experiments were performed to simulate hydrodynamics and morphodynamic processes. The hydrodynamics was modeled using the Delft3D Flow model. The spectral wave model SWAN (Simulating WAves Near shore) was used to calculate the wind wave parameters (propagation direction, wave length and height, near-bottom orbital velocities). Alteration of coastal zone profile under the impact waves and the hydrodynamic of tidal and wind currents was performed using the Delft3-MOR morphodynamics module included in the Delft3D software package. The results of numerical experiments have shown that the dynamics of the coastal bottom topography is determined by sediment transport forced by combined action of waves and currents. Comparison of the modeling results with information on the distribution of Zostera of previous studies and field surveys data showed a high agreement with model data on the spatial distribution of erosion and accumulation zones in the coastal zone.

Keywords: modeling, Delft3D, morphodynamics, zostera distribution

УДК 550.465

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ОРГАНИЧЕСКИЙ УГЛЕРОД И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДОННЫХ ОСАДКОВ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

© 2024 г. Е. А. Стрельцова*, Н. А. Беляев, В. Ю. Федулов, Е. М. Пушкарева

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

*e-mail: Alena.st@mail.ru

Поступила в редакцию 04.08.2023 г. После доработки 04.10.2023 г. Принята к публикации 16.11.2023 г.

Исследован верхний слой донных осадков северо-восточной части Карского моря. Показано, что в составе осадков преобладает алеврит, доля песка увеличивается по мере приближения к берегу. Содержание органического углерода (среднее значение — 1.1% масс.) близко к среднему содержанию в осадках Карского моря, увеличиваясь на глубоководных станциях. Выявленная линейная зависимость между содержанием органического углерода и площадью поверхности осадка показывает, что сорбция на поверхности частиц является преимущественной формой аккумуляции органического вещества (OB) в осадках. Средняя концентрация *н*-алканов в исследованных пробах — 1.1 мкг/г осадка, в спектре распределения доминируют нечетные высокомолекулярные гомологи терригенного происхождения.

Ключевые слова: гранулометрический состав, органический углерод, *н*-алканы, биомаркеры, донные осадки, Карское море, Арктика

DOI: 10.31857/S0030157424020117 EDN: RULYWH

Донные осадки Карского моря, включая состав и содержание в них органического вещества, сравнительно хорошо изучены в полярном регионе [14, 17]. Однако северо-восточная часть моря исследована недостаточно подробно по сравнению с эстуарными зонами и центральными районами моря. Ранее исследования проводились в основном в вышеуказанных областях и фокусировались на транспорте терригенного материала со стоком сибирских рек. Район желоба Воронина представляет особый интерес при исследовании процессов осадконакопления в шельфовых зонах, так как находится под наименьшим влиянием речного стока [9], но при этом подвержен воздействию как атлантических вод, так и вод центрально-арктического бассейна [16].

Целью работы являлось выявление возможных отличий в составе органического вещества (OB) осадков северо-восточной части Карского моря от состава OB осадков центральной части моря, вызванных повышенным влиянием центрального арктического бассейна на процессы осадконакопления, а также определение границ доминирования в осадках терригенного органического вещества, поступающего с речным стоком.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили образцы поверхностного слоя (0–1 см и 2–3 см) донных осадков, отобранные в 89-м рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" (октябрь 2022 г.) на геологическом разрезе, выполненном в северо-восточной части Карского моря (рис. 1). Разрез приурочен к западной части желоба Воронина, отделенного от основного бассейна Карского моря обширной мелководной зоной. Станции разреза располагались в зоне глубин от 72 до 1652 м (табл. 1, рис. 2а), затрагивая как зону шельфа, так и область континентального склона.

Пробы поверхностного слоя донных осадков отбирались бокскорером "Бокс-5" с размерами пробоотборника 50 × 50 × 60 см. В кернах, отобранных из бокскорера с помощью пластиковой врезки диаметром 120 мм, стандартно выделялся верхний полужидкий слой, обводненный горизонт мощностью ~1 см, и далее колонка делилась на равные слои толщиной 1 см. Средний выход керна составлял 30 см. Граница окисленного и восстановленного слоя располагалась на горизонтах 5—40 см. В процессе отбора проводилось литологическое описание.



Рис. 1. Расположение станций пробоотбора (синие кружки). Черными ромбами показаны места определения содержания С_{орг} в поверхностных слоях донных осадков.

Образцы для биогеохимических исследований замораживались немедленно после отбора, хранились и транспортировались в морозильной камере при —20°С до проведения лабораторных исследований. Пробы для литолого-минералогических исследований хранились и транспортировались при температуре 5°С герметично закрытыми. Процесс отбора, хранения и транспортировки образцов обеспечивал неизменность состава осадков в интервале между отбором проб и их анализом.

Определение гранулометрического состава основывалось на методике, принятой в АО ИО РАН [10], и включало две стадии: мокрую отситовку песчаной фракции и последующий приборный анализ алевро-пелитовой фракции. В качестве литологического деления была принята шкала: пелит (<2 мкм), алеврит (2–63 мкм), песок (>63 мкм) [20]. Параллельно гравиметрически определялась влажность образца.

После мокрой отситовки песчаная фракция крупнее 63 мкм высушивалась в течении трех дней при 60°С и подвергалась сухому рассеву на колонне сит с размером ячеек 2 мм, 1 мм, 500 мкм, 250 мкм, 125 мкм и последующему взвешиванию. Перед приборным анализом отситованная фракция диаметром менее 63 мкм выдерживалась в течение суток в дистиллированной воде с добавлением раствора гексаметафосфата натрия (0.7% Na₆P₆O₁₈). Непосредственно перед анализом про-

ба подвергалась диспергированию в ультразвуковой ванне.

Приборный анализ алевро-пелитовой фракции проводился на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц SHIMADZU SALD 2300. Для проведения измерения в проточную ячейку лазерного анализатора вводилось необходимое количество (2-3 мл) предварительно подготовленной суспензии. В анализаторе проба подвергалась воздействию ультразвука в течение 1 минуты. С выключенным ультразвуковым диспергатором, дождавшись стабилизации графика гранулометрического распределения, фиксировались результаты измерения. Результаты гравиметрических определений объединялись с данными, полученными на лазерном анализаторе частиц, исходя из допушений о единстве плотностей и форм частиц во всем размерном диапазоне. Расчет площади поверхности осадка для оценки его сорбционной емкости был выполнен исходя из тех же допущений.

Определение органического углерода (Сорг) и карбонатного углерода (С_{карб}) выполнялось на анализаторе TOC-Vcph фирмы "Shimadzu" с приставкой SSM-5000А. Сущность метода, положенного в основу прибора, заключается в каталитическом окислении содержащихся в пробе соединений углерода при температуре до 1000°С в присутствии кислорода или кислородсодержащего газа до СО₂ и последующем его определении с использованием инфракрасного детектора. Площадь регистрируемого пика пропорциональна содержанию углерода в пробе. Для донных осадков диапазон измеряемых значений составляет 2-10000 мкг С. Воспроизводимость результатов анализов 5%. Перед началом серии анализов проводилась калибровка прибора по стандартным образцам [2].

В основе методов экстракции липидной фракции из образцов донных осадков лежат принципы наиболее полного извлечения исследуемых компонентов из матрицы объектов и исключение возможности трансформации органического вещества и его потерь в процессе пробоподготовки. Экстракция общей липидной фракции органического вещества проводилась из мокрых быстроразмороженных образцов донных осадков в ультразвуковой бане последовательно с помощью растворителей: первая экстракция — метанолом, вторая и третья экстракции — смесью хлористый метилен-метанол (2:1). Объединенные экстракты отмывались от нелипидных примесей подкисленной до рН 2 дистиллированной водой [5]. После упаривания экстракта на роторном испарителе липидная фракция делилась на неполярную и полярные фракции липидов методом колоночной хроматографии на силикагеле. В качестве элюента для выделения неполярной фракции
использовался гексан. Полярные фракции последовательно элюировались смесью хлористый метилен—метанол, ацетоном, метанолом [11] и анализировались отдельно.

В неполярной фракции определялось содержание нормальных алифатических углеводородов (н-алканов) методом газо-жидкостной хроматографии. Анализ проводился на хроматографе Shimadzu GC-2010 с пламенно-ионизационным детектором. Условия анализа: колонка Restek Rxi-5Sil MS длиной 30 м, диаметром 0.25 мм, и толщиной нанесенной фазы 0.25 мкм, нагрев от 60 до 320°С со скоростью 4°С/мин, газ-носитель гелий, расход 1.5 мл/мин, режим деления потоков 1/80. Для калибровки прибора и определения времени выхода идентифицируемых веществ использовалась смесь калибровочных стандартов углеводородов nC₁₀-nC₄₀ (Fluka 04070, 04071). Для расчета концентраций использовался внутренний стандарт — сквалан (2,6,10,15,19,23-гексаметилтетракозан). Чувствительность метода составляла 1 нг инливилуального компонента в вволимой пробе, объем вводимой пробы 2 мкл. Воспроизводимость 5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гранулометрический состав. Для всех станций разреза характерно преобладание песчаной и алевритовой фракций в составе осадков (табл. 1) над пелитовой, доля которой не превышает 15%. Для большинства исследованных проб характерно бимодальное распределение частиц (рис. 2б) с максимумами на 8 и 100 мкм (рис. 3а). Гранулометрический состав осадков поверхностного и подстилающего горизонтов практически полностью идентичен, но при этом прослеживается тенденция незначительного увеличения доли песка в поверхностном горизонте относительно подстилающего. На двух глубоководных станциях разреза (ст. 7494, 7498) доля алеврита превышает долю песка, по мере приближения к берегу песок начинает преобладать (рис. 3г). Существенные отличия гранулометрического состава зафиксированы в осадках ст. 7501 (рис. 3в). Песчаная фракция в них практически отсутствует, распределение мономодально, преобладает алеврит (>80%).

Все исследованные осадки, за исключением осадков ст. 7501, сформированы плохо сортированным материалом (коэффициент сортировки 4—5). Коэффициент сортировки возрастает по мере уменьшения глубины пробоотбора, за счет увеличения доли песчаной фракции. При этом при исключении песчаной фракции из расчетов коэффициентов сортировки они остаются практически неизменными для всех изученных

образцов (коэффициент сортировки ~3). Модальный диаметр алевропелитовой фракции также одинаков для всех образцов (7.5 мкм), что показывает единый источник поставки алевропелита в осадки. Исключение — ст. 7498 (рис. 36). Модальный диаметр алевропелита в ней 15 мкм, а распределение частиц по размерам существенно отличается от распределения на остальных станциях.

Содержание органического углерода. Содержание органического углерода в донных осадках разреза варьирует от 0.46% в поверхностном горизонте шельфовой ст. 7502 до 2% в поверхностном горизонте глубоководной ст. 7494 (табл. 1, рис. 2в). Среднее содержание Сорг во всех исследованных пробах составляет около 1%, что совпадает со средними величинами для моря [14]. Для глубоководных станший разреза (ст. 7494. 7498, 7501) характерно увеличение содержания Сорг в поверхностном горизонте относительно подповерхностного. Данный факт наиболее ярко выражен для самой глубоководной станции (ст. 7494), где в поверхностном горизонте содержание Сорг на 40% больше, чем в подповерхностном (0-0.5 см 2%, 2-3 см 1.41%). Для песчаных осадков шельфовой зоны содержание углерода в исследованных горизонтах практически идентично. Исключение составляет ст. 7502, где содержание углерода на поверхности меньше, чем в подстилающем горизонте.

Ранее было показано, что для шельфовых осадков арктических морей существует тесная связь между гранулометрическим составом и содержанием в них С_{орг} [1, 13]. Данная зависимость также прослежена для исследованных проб разреза (рис. 4). В отличие от предыдущих работ, где для исследования зависимостей использовалось суммарное содержание пелитовой и алевритовой фракции, нами был выполнен расчет суммарной площади поверхности частиц. На взгляд авторов, использование для расчета площадей поверхности более точно позволяет разделить углерод, сорбируемый на поверхности частиц от включений детрита.

По всем исследованным пробам выявлена достоверная линейная зависимость ($R^2 = 0.71$) содержания С_{орг} в осадках от суммарной площади поверхности частиц. При этом фиксируются две точки с повышенным относительно тренда содержанием углерода. Это поверхностные горизонты станций 7494 и 7505. Относительное повышение концентраций органического углерода позволяет предположить наличие дополнительного источника поставки OB в осадки на данных горизонтах. При исключении данных точек из расчета линии тренда коэффициент корреляции существенно возрастает ($R^2 = 0.86$).



Рис. 2. Профиль глубин северо-восточной части Карского моря с указанием станций пробоотбора (а); гранулометрический состав поверхностных ДО (0-1см) (б); С_{орг}, % и сумма *н*-алканов, мкг/г осадка (в); сумма *н*-алканов, мкг/г С_{орг} и сумма высокомолекулярных *н*-алканов (С₂₇, С₂₉, С₃₁), мкг/г С_{орг} (г). 1 – коэффициент сортировки в поверхностном слое ДО (0–1 см); 2 – коэффициент сортировки в подповерхностном слое ДО (2–3 см); 3 – содержание пелитовой фракции в поверхностном слое ДО; 4 – содержание алевритовой фракции в соверхностном слое ДО (2–3 см); 3 – содержание пелитовой фракции в поверхностном слое ДО; 4 – содержание алевритовой фрак-

1 – коэффициент сортировки в поверхностном слое ДО (0–1 см); 2 – коэффициент сортировки в подповерхностном слое ДО (2–3 см); 3 – содержание пелитовой фракции в поверхностном слое ДО; 4 – содержание алевритовой фракции в поверхностном слое ДО; 5 – содержание песчаной фракции в поверхностном слое ДО; 6 – С_{орг} в поверхностном слое ДО (0–1 см); 7 – С_{орг} в подповерхностном слое ДО (2–3 см); 8 – сумма *н*-алканов (мкг/г С_{орг}) в подповерхностном слое ДО (2–3 см); 10 – сумма *н*-алканов (мкг/г содержание) в поверхностном слое ДО (2–3 см); 10 – сумма *н*-алканов (мкг/г содержание) в поверхностном слое ДО (2–3 см); 10 – сумма *н*-алканов (мкг/г содержание) в поверхностном слое ДО (2–3 см); 12 – сумма высокомолекулярных *н*-алканов (С₂₇, С₂₉, С₃₁) (мкг/г С_{орг}) в подповерхностном слое ДО (2–3 см).

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024



Рис. 3. Гранулометрическая характеристика осадков поверхностного горизонта в северо-восточной части Карского моря.

Карбонаты в осадках обнаружены только на ст. 7494 и 7498 в северной части разреза (табл. 1). Концентрация их незначительна. На всех остальных станциях карбонатный углерод не обнаружен.

Содержание и состав нормальных алифатических углеводородов. Содержание н-алканов в осадке варьирует от 1 до 3.4 мкг/г осадка (табл. 2, рис. 2в) при среднем по всем исследованным образцам 1.7 мкг/г. Максимум их содержания отмечен в поверхностном горизонте ст. 7494 ($3.4 \,\mathrm{MKr/r}$), повышенные содержания — на ст. 7501 и 7505 (табл. 2). Доля н-алканов в составе ОВ меняется от 105 до 211 мкг/г Сорг при среднем содержании 158 мкг/г Сорг. Содержание н-алканов в осадках прямо пропорционально содержанию органического вещества ($R^2 = 0.75$), при этом отношение н-алканы/Сорг различно для мористых (ст. 7494, 7498) и прибрежных станций разреза (табл. 2). При исключении двух мористых станций коэффициент корреляции между содержанием н-алканов и Сорг возрастает до 0.89.

В спектре распределения *н*-алканов доминируют нечетные высокомолекулярные гомологи (C_{23} - C_{33}). Их количество в составе алканов меняется от 45 до 76% отн. со средним значением 69% (табл. 2). Из них основная доля приходится на гомологи C_{27} - C_{31} (27–53% отн.) с явным преобладанием гомолога C_{31} (10–20%).

Содержание терригенных (C_{27} , C_{29} , C_{31}) алканов варьирует от 0.4 до 1.3 мкг/г осадка (табл. 2, рис. 2г) при среднем значении 0.75 мкг/г. При этом для большинства исследованных проб характерное содержание терригенных алканов составляет 0.4–0.6 мкг/г, повышенные значения фиксируются на ст. 7501 и 7505 (1.1–1.3 мкг/г). Доля терригенных алканов в составе OB растет по мере приближения к берегу от 40 до 100 мкг/г C_{opr} (табл. 2, рис. 2).

Доля низкомолекулярных гомологов ($C_{12}-C_{22}$), которые маркируют OB автохтонного происхождения, в среднем не превышает 17%. Их относительно высокие содержания отмечены только на ст. 7494, где в поверхностном горизонте их доля составляет 35%. Необходимо отметить, что на всех хроматограммах выявлено присутствие неидентифицированных соединений в низкомолекулярной области, доля которых значительно превышает долю нормальных углеводородов (рис. 5). Высокие значения индекса СРІ (среднее 5.4) показывают низкую степень преобразованности терригенного ОВ. При этом для прибрежной части разреза характерны более высокие значения индекса СРІ, чем для мористой (табл. 2), что маркирует увеличение степени трансформации ОВ по мере удаления от суши. Наиболее низкое значение СРІ (2.7) зафиксировано в поверхностном горизонте ст. 7494, где процессы преобразования ОВ проходят наиболее активно. Об увеличении степени трансформации ОВ по мере удаления от берега также свидетельствует отношение $(C_{23} + C_{25})/(C_{29} + C_{31})$. Для прибрежных станций данное отношение ниже, чем для мористых, что



Рис. 4. Взаимосвязь содержания органического углерода с гранулометрическим составом донных осадков северо-восточной части Карского моря.

так же показывает идущий процесс трансформации ОВ.

В низкомолекулярной области спектра отсутствует ярко выраженное преобладание как четных, так и нечетных гомологов (ОЕР_{С17}). Это говорит о значительной степени преобразованности той малой доли автохтонного OB, которое аккумулируется в донных осадках.

Отношение пристан/фитан (Pr/Ph > 1) показывает, что формирование автохтонного OB происходило преимущественно в окислительных условиях, однако общее содержание низкомолекулярных гомологов в исследованных образцах незначительно, что не позволяет говорить об этом с уверенностью.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для исследованного разреза характерно преобладание алеврита в составе осадков. Такой гранулометрический состав является типичным для бассейна Карского моря. Повышенное содержание пелитовой фракции выявлено только в устьевых и эстуарных зонах [7, 17], а преобладание песка характерно для перемываемых прибрежными течениями осадков зоны глубин до 30 м юго-западной части моря [6]. При этом содержание песчаной фракции в исследованных алевритовых осадках больше, чем в алевритах центральной части моря [12, 17]. Для осадков Баренцева моря в целом характерно преобладание более тонкого материала, гранулометрический состав осадков



Рис. 5. Типичные хроматограммы неполярных фракций углеводородов (а – ст. 7494, б – ст. 7503).

СТРЕЛЬЦОВА и др.

№ станции	Горизонт, см	Глубина дна, м	Координаты		Грануло	метрический	состав, %	снт ли		
			с.ш.	В.Д.	пелит (<2 мкм)	алеврит (2—63 мкм)	песок (>63 мкм)	Коэффици сортировк σ _G *	С _{орг} , % масс.	С _{карб} , % масс.
7494	0-0.5	1652	82.228	78.486	11.1	67.2	21.7	4.7	2.00	0.064
	2-3	1032			12.1	67.4	20.5	4.6	1.41	0.011
7498	0-1	196	80.899	81.654	7.7	74.5	17.8	4.2	1.34	0.016
	2-3				10.7	71.2	18.1	4.6	1.12	н.о.
7500	0-1	83	79.732	83.038	6.1	43.0	50.9	5.0	0.81	н.о.
	2-3				5.9	46.0	48.1	4.7	0.87	Н.О.
7501	0-1	202	79.266	87.635	14.0	80.9	5.1	3.3	1.59	Н.О.
	2-3	292			11.2	83.2	5.6	3.2	1.54	н.о.
7502	0-1	220	78.599	88.072	4.9	39.0	56.1	5.0	0.46	н.о.
	2-3	230			6.5	40.1	53.4	5.5	0.78	н.о.
7503	0-1	104	78.015	88.623	4.1	32.7	63.2	4.7	0.57	н.о.
	2-3				5.7	40.0	54.3	5.2	0.53	н.о.
7505	0-1 2-3	72	76.969	87.676	4.9	49.1	46.0	5.6	1.17	н.о.
					8.9	46.2	44.9	4.9	1.17	Н.О.

Таблица 1. Гранулометрический состав и содержание органического (С_{орг}) и карбонатного (С_{карб}) углерода в донных осадках северо-восточной части Карского моря

 $\sigma_{G} = \exp((\ln(P84) - \ln(P16)) / 4 + (\ln(P95) - \ln(P5)) / 6.6),$ где P — размер частиц в мкм, обозначающий границу, которая отсекает 5, 16, 84 и 95% всех частиц в образце меньших или равных по размеру.

Таблица 2. Основные органо-геохимические индексы образцов донных осадков северо-восточной части Карско-го моря

Станция	7494		7498		7500		7501		7502		7503		7505	
Горизонт	0-0.5	2-3	0-1	2-3	0-1	2-3	0-1	2-3	0-1	2-3	0-1	2-3	0-1	2-3
Сорг, % масс.	2.00	1.41	1.34	1.12	0.81	0.87	1.59	1.54	0.46	0.78	0.57	0.52	1.17	1.17
CPI*	2.7	4.6	5.2	5.0	5.1	5.4	5.3	5.8	5.7	6.6	5.8	6.2	5.7	6.3
OEP _{C17}	1.3	1.4	1.4	1.5	2.0	2.0	1.9	1.5	1.9	2.2	1.5	1.4	1.8	2.0
OEP _{C19}	1.4	1.5	1.6	1.7	2.2	2.2	1.6	1.7	1.9	2.0	1.7	1.7	1.9	2.0
$i-C_{19}/i-C_{20}$	2.1	0.5	1.0	0.7	2.0	1.9	2.1	1.3	4.0	4.1	2.9	1.3	3.4	3.3
$i-C_{19}/C_{17}$	0.8	0.2	1.8	1.4	1.1	1.0	1.1	0.8	1.4	1.0	1.2	0.5	1.0	0.8
$i-C_{20}/C_{18}$	0.4	0.4	2.3	2.5	0.7	0.6	0.6	0.7	0.5	0.3	0.5	0.5	0.3	0.3
н-алканы, мкг/г	3.4	1.6	1.4	1.2	1.1	1.2	2.6	2.3	1.0	1.2	1.1	1.0	2.3	2.2
н-алканы/С _{орг} , мкг/г	172	110	105	105	138	137	164	148	211	153	188	198	198	185
С ₂₇₊₂₉₊₃₁ , мкг/г	0.9	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	1.3	1.2	0.4	0.6	0.5	0.5	1.1	1.1
$C_{27+29+31}/C_{opr}$, мкг/г	47	40	45	47	60	62	79	78	91	76	91	101	98	98

 $* CPI = 0.5 \times [(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32}) + (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{30})]$

моря Лаптевых сходен с осадками Карского [17, 18, 19]. Бимодальное размерное распределение в большинстве проб донных осадков позволяет предположить наличие нескольких источников поставки материала в донные осадки, а присутствие отдельного пика песчаной фракции во всех пробах может указывать на вклад ледового разноса в формирование осадочного чехла.

Среднее содержание органического углерода в осадках северо-восточной части Карского моря также сходно со средним для всего бассейна моря. Наличие линейной зависимости содержания

360

Сорг от площади поверхности частиц позволяет предположить, что преимущественным способом накопления углерода в осадках является его сорбция на поверхности частиц. Данный факт раннее отмечался для моря Лаптевых [18]. При этом в поверхностных горизонтах двух мористых станций было отмечено существенное повышение содержания Соог относительно сорбирующей поверхности, что указывает на присутствие дополнительного источника поставки ОВ в осадки. Также практически для всех исследованных станций содержание Сорг в поверхностном горизонте выше, чем в подстилающем. Увеличение содержания органического углерода в поверхностных слоях осадков Карского моря фиксировалось ранее [2, 4] и может объясняться дополнительными поставками органического вещества в процессе седиментации [3, 8]. Уменьшение нетипично и, возможно, связано с активными гидродинамическими процессами.

Поставку новообразованного автохтонного ОВ в поверхностный горизонт наиболее глубоководной станции разреза 7494 также хорошо маркирует заметное увеличение в нем содержания н-алканов как в абсолютных, так и в относительных значениях. При этом возрастание концентраций углеводородов в данном горизонте обусловлено повышенными концентрациями алканов низкомолекулярной области спектра (С12-С22) (56 мгк/г Сорг, рис. 5А), связанных с продукцией гидробионтов. Доля низкомолекулярных гомологов в спектре алканов составляет 35%, тогда как среднее по всем исследованным пробам не превышает 17% (рис. 56). Относительное увеличение содержания н-алканов автохтонного генезиса также отмечено в поверхностном слое осадков ст. 7502. Однако на данной станции увеличение концентрации н-алканов низкомолекулярной области (до 33 мгк/г Сорг) связано не с увеличенными поставками автохтонного ОВ в осадки, а с заметным снижением концентраций Сорг в данном горизонте.

Доля алканов терригенного генезиса в составе $OB(C_{27}, C_{29}, C_{31})$ снижается с увеличением расстояния от берега. При этом также снижается индекс СРІ, показывающий степень преобразованности ОВ, маркируя процессы преобразования органического вещества (табл. 2). Прямая корреляция содержания терригенных алканов с Сорг в морях Российской Арктики характерна для устьевых зон, на открытом шельфе она прослеживается сильно хуже [15, 18]. Отсутствие данной зависимости для исследуемого района показывает многообразие источников поставки ОВ в осадки с пониженной по сравнению с центральной частью моря ролью ОВ речного стока. При этом прослеживаемые корреляционные зависимости суммарного содержания *н*-алканов от Сорг и Сорг от гранулометрического состава показывают устойчивую связь захоранивающегося OB с минеральной матрицей.

Необходимо отметить зависимость изменения индекса СРІ от горизонта отбора. Типично, в процессе биогеохимических преобразований ОВ разница в концентрациях нечетных и четных алканов уменьшается, соответственно уменьшается и значение индекса СРІ. При условии, что взвешенное вешество является единственным источником органического вещества в осадках, индекс СРІ в алканах взвеси должен быть выше, чем в верхнем слое донных осадков. В свою очередь, в верхнем слое осадков должны фиксироваться более высокие значения индекса, чем в подстилающих горизонтах. В исследованном районе ситуация обратная. Индекс СРІ в пробах поверхностного горизонта значимо ниже, чем в подстилающих осадках для большинства исследованных станций. Это позволяет говорить о том, что высокомолекулярные н-алканы терригенного генезиса подстилающего горизонта (2-3 см) менее преобразованы, чем поверхностного (0-1 см), что в целом нетипично для донных отложений. При этом индекс СРІ исследованных образцов алканов взвеси существенно ниже и составляет менее 2 [3]. Это показывает, что терригенная составляющая алканов взвеси гораздо более глубоко преобразована, чем та же составляющая алканов осадков. На основании данных фактов можно сделать предположение, что н-алканы взвеси осеннего периода оказывают только незначительное влияние на формирование ОВ поверхностного слоя донных осадков и не фиксируются в подстилающих горизонтах. Однако органическое вещество взвеси может обогащать ОВ донных осадков алканами терригенного генезиса, образующимися в результате процессов деструкции липидной фракции ОВ взвеси.

Содержание терригенных *н*-алканов (C_{27} , C_{29} , С₃₁) в исследованных образцах осадков существенно ниже, чем в образцах из зоны выноса Оби и Енисея. По литературным данным [15] среднее содержание гомологов С27, С29, С31 в осадках зоны выноса составляет 4.5 мкг/г (по 13 станциям) тогда как в исследованных образцах — в шесть раз меньше (0.75 мкг/г, по 7 станциям). Те же тенденции наблюдаются и для доли терригенных алканов в составе ОВ. Среднее значение для исследованных проб — 72 мкг/г Сорг, для зон речного выноса — 316 мкг/г Сорг. Также терригенные алканы зоны выноса значительно более трансформированы. Для них характерное значение CPI — 3, для исследованных проб — более 5. Это показывает, что большинство терригенных алканов, поставляемых с речным стоком, осаждается, не доходя до исследуемого района.

выводы

Исследованный район находится под минимальным влиянием речного стока по сравнению с другими областями Карского моря. Исходя из этого факта, при начале работ авторы предполагали обнаружить отличия как гранулометрического состава осадков, так и содержания и состава органического вещества от других районов. Однако по завершении исследований сушественных отличий выявлено не было. Гранулометрический состав осадков северо-восточной части моря сходен с составом осадков центральной части, среднее содержание органического углерода также совпадает со средним по морю. В гранулометрическом составе осадков обычно преобладает алеврит, при этом размерное распределение частиц бимодально и практически во всех образцах фиксируется примесь песка, которая увеличивается в осадках станций, расположенных ближе к берегу. Среднее содержание Сорг составляет 1.1% (14 проб, 7 станций), при этом содержание C_{opr} в поверхностных горизонтах (0–1см) обычно выше, чем в подстилающих (2-3 см). Существенное увеличение концентрации Сорг (2%) зафиксировано лишь на одном поверхностном горизонте самой глубоководной станции разреза (ст. 7494). Показано существование линейной зависимости между содержанием органического углерода и площадью поверхности частиц осадка, рассчитанной по данным лазерного дифракционного анализа. Устойчивая корреляция между этими двумя параметрами указывает, что сорбция на поверхности частиц может являться преимушественной формой аккумуляции ОВ в осадках. Ухудшение данной зависимости для отдельных поверхностных горизонтов связано с повышением концентраций Сорг, обусловленным поставками планктоногенного ОВ. Средняя концентрация н-алканов по всем исследованным пробам составила 1.1 мкг/г осадка. Показана тесная связь концентраций н-алканов с содержанием органического вещества в осадках ($R^2 = 0.75$). Установлено, что в спектре распределения нормальных углеводородов доминируют нечетные высокомолекулярные гомологи, которые маркируют ОВ терригенного происхождения. При этом доля терригенных алканов в спектре увеличивается на станциях разреза, приближенных к берегу. Выявлено увеличение индекса CPI в подстилающем слое осадков, показывающее уменьшение степени преобразованности ОВ. Характерные концентрации терригенных углеводородов для исследованного района существенно ниже, чем для зоны выноса Оби и Енисея.

Ранее в работе В.И. Петровой с соавт. [15] была показана четкая смена состава органического вещества континентального склона по сравнению с ОВ шельфовых осадков. На склоне в осадках доминирует OB автохтонного происхождения, на шельфе аллохтонного. Планируя настоящую работу, авторы надеялись выявить данный переход для исследуемого района. Однако этого сделать не удалось. В составе органического вещества на всех исследованных станциях доминирует OB аллохтонного генезиса. Возможно, граница смены условий накопления OB в осадках расположена северней исследованного разреза.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2024-0019. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность академику РАН М.В. Флинту за всестороннюю поддержку их исследований и Е.А. Романкевичу за научное руководство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Беляев Н.А.* Органическое вещество и углеводородные маркеры Белого моря: Дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.28. М., 2015. 172 с.
- 2. Беляев Н.А., Пересыпкин В.И., Поняев М.С. Органический углерод воды, взвеси и верхнего слоя донных осадков западной части Карского моря // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 748–757.
- Беляев Н.А., Поняев М.С. Органическое вещество пограничных зон Карского моря // Экосистема Карского моря — новые данные экспедиционных исследований: Материалы научной конференции, Москва, 27–29 мая 2015 года / Под ред. Флинта М.В. Москва: ООО "АПР", 2015. С. 227– 231.
- 4. Беляев Н.А., Поняев М.С., Кирютин А.М. Органический углерод воды, взвеси и верхнего слоя донных осадков центральной части Карского моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 563–576.
- Беляева А.Н. Экстракция липидов из морской и иловой воды, взвеси и донных осадков // Методы исследования органического вещества в океане / Под ред. Романкевича Е.А. М.: Наука. 1980. 344 с.
- Кошелева В.А., Яшин Д.С. Донные осадки Арктических морей России / Под ред. Грамберга И.С. СПб.: ВНИИ Океангеология, 1999. 112 с.
- Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р. Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики. М.: ГЕОС, 2007. 404 с.
- 8. Леин А.Ю., Маккавеев П.Н., Саввичев А.С. и др. Процессы трансформации взвеси в осадок в Карском море // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 643–679.

- мы. М.: Научный мир. and Buria
- Осадчиев А.А. Речные плюмы. М.: Научный мир, 2021. 288 с.
- 10. *Свальнов В.Н., Алексеева Т.Н.* Гранулометрический состав осадков Мирового океана. М.: Наука, 2005. 297 с.
- Couturier L.I.E., Michel L.N., Amaro T. et al. State of art and best practices for fatty acid analysis in aquatic sciences // Journal of Marine Science 2020. V. 77. № 7–8. P. 2375–2395. http://doi.org/10.1093/ icesjms/fsaa121
- Felden J.; Möller L.; Schindler U. et al PANGAEA Data Publisher for Earth & Environmental Science. // Scientific Data. 2023. V. 10. № 1. P. 347. https://doi. org/10.1038/s41597-023-02269-x
- Macdonald R.W., Naidu A.S., Yunker M.B. et al. The Beaufort Sea: Distribution, Sources, Fluxes and Burial Rates of Organic Carbon // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.) The organic carbon cycle in the Arctic ocean. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 177–193.
- Martens J., Romankevich E., Semiletov I. et al. CAS-CADE – The Circum-Arctic Sediment CArbon DatabasE. // Earth Syst. Sci. Data. 2021. V. 13. P. 2561–2572. https://doi.org/10.5194/essd-13-2561-2021
- 15. Petrova V.I., Batova G.I., Zinchenko A.G. et al. The East Siberian Sea: Distribution, Sources, Variability

and Burial of Organic Carbon // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.) The organic carbon cycle in the Arctic ocean, Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 204–212.

- Pivovarov S., Schlitzer R., Novikhin A. River run-off influence on water mass formation in the Kara Sea // In: Stein R. et al (Eds.) Siberian river run-off in the Kara Sea. Elsevier Science, 2003. P. 9–25.
- Stein R., Fahl K. The Kara Sea: Distribution, Sources, Variability and Burial of Organic Carbon // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.) The organic carbon cycle in the Arctic ocean. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 237–266.
- Stein R., Fahl K. The Laptev Sea: Distribution, Sources, Variability and Burial of Organic Carbon // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.) The organic carbon cycle in the Arctic ocean Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 213–237.
- Vetrov A.A., Romankevich E.A. The Barents Sea: Distribution, Sources, Variability and Burial of Organic Carbon // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.) The organic carbon cycle in the Arctic ocean Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 266–278.
- Wentworth C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments // The Journal of Geology. 1922. V. 30. № 5. P. 377–392.

GRAIN SIZE DISTRIBUTION, ORGANIC CARBON AND GEOCHEMICAL MARKERS IN THE SURFACE LAYER OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE NORTHEASTERN PART OF THE KARA SEA

E. A. Streltsova[#], N. A. Belyaev, V. Y. Fedulov, and E. M. Pushkareva

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia #e-mail: Alena.st@mail.ru

The upper layer of bottom sediments in the northeastern part of the Kara Sea is studied. It is shown that the composition of sediments is dominated by silt, the proportion of sand increases towards the shore. The content of organic carbon (average value -1.1% wt.) is close to the average content in sediments of the Kara Sea, increasing at deep-sea stations. The revealed linear relationship between the content of organic carbon and the surface area of sediment shows that sorption on the particles surface is the predominant accumulation form of organic matter (OM) in sediments. The average n-alkanes concentration in the analysed samples is $1.1 \mu g/g$ of sediment, the distribution spectrum is dominated by terrigenous origin odd high-molecular homologues.

Keywords: grain size distribution, organic carbon, n-alkanes, biomarkers, bottom sediments, Kara Sea, Arctic

—— МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ ——

УДК 551.435.3, 551.35

«Унас нет другой цели, как жить в согласии с Природой» Луций Анней Сенека—мл. 4 г. до н.э.— 65 г. н.э.

СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ОТМЕЛОГО ПЕСЧАНОГО БЕРЕГА ПРИЛИВНОГО МОРЯ (НА ПРИМЕРЕ О. МАДАГАСКАР)

©2024 г. Н. Н. Дунаев^{1, *}, И. О. Леонтьев¹, Т. Ю. Репкина^{1, 2}

¹Институт океанологии им. П. П. Шириюва РАН, Москва, Россия ²Институт географии РАН, Москва, Россия *e-mail: dunaev@ocean.ru Поступила в редакцию 05.07.2023 г. После доработки 11.07.2023 г. Принята к публикации 18.07.2023 г.

В настоящее время большинство морских берегов испытывают усиление размыва и отступление. В значительной мере это относится к берегам, подверженным влиянию высокоамплитудных морских приливов, что крайне негативно проявляется на аккумулятивных берегах океанских островов. Решение проблемы их динамики, теоретические основы которой находятся еще в стадии разработки, может базироваться только на основе широкорегиональных исследований. Данная работа направлена на выяснение особенностей динамики такого берега на примере ключевого района крупного океанского острова. Выявлены основные причины его деградации, даны рекомендации по стабилизации береговой линии и рассмотрена тенденция развития по природному сценарию.

Ключевые слова: береговая зона, песчаные наносы, пляж, литодинамика, неотектоника, геоморфология, уровень моря

DOI: 10.31857/S0030157424020129 EDN: RULMCU

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные публикации по аккумулятивным морским берегам разных районов нашей планеты и доклады на тематических региональных и международных конференциях свидетельствуют о том, что в последние десятилетия около 70% из них испытывают усиление размыва и отступление [30]. По данным спутниковых наблюдений 1984-2015 гг., общая поверхность эродированных приморских земель (исключая побережье России) составляет около 28 000 км² [28]. В связи с этим и прогрессирующим продвижением человечества к морю¹ исследование береговой зоны становится в приморских странах приоритетным направлением в изучении океана. В значительной мере это относится к океаническим островам с их уникальной природной средой, высокой изменчивостью, контрастностью и экстремальным проявлением природных характеристик. В последние десятилетия происходит активизация освоения таких территорий, особенно их приморских районов. Это повышает актуальность решения задачи определения тенденций развития островных геосистем в целом и их береговых зон в частности.

Объект исследований представлен районом Морондава — одним из развитых объектов пляжно-купальной рекреации и активного туризма острова Мадагаскар, расположенного на отмелом аккумулятивном побережье его западной окраины (рис. 1).

Выбор острова Мадагаскар был во многом обусловлен его развитием в относительно стабильных климатических условиях в течение миллионов лет, обусловленных его субэкваториальным расположением.

Это позволяет решить ряд фундаментальных вопросов пространственно-временной организации его ландшафтов, в том числе применительно к береговым геосистемам. Последние различаются по структурно-тектоническому положению,

¹ Согласно сценариям МГЭИК, население прибрежных районов мира может вырасти с 1.2 млрд в 1990 г. до примерно 1.8–5.2 млрд человек к 2080-м гг.



Рис. 1. Обобщенная орографическая карта Мадагаскара и расположение района Морондава [24].



Рис. 2. Пляж в районе Морондава (фото из открытых источников).



Рис. 3. Вид на г. Морондава [34].

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

литологии, рельефу, специфике влагооборота, локальной атмосферной и морской циркуляции.

Одной из особенностей исследуемого района является подверженность влиянию существенных морских приливов [9]. На отмелых аккумулятивных берегах приливно-отливные процессы обычно являются одним из важнейших факторов в динамике береговой линии и прибрежно-морских наносов, потенциально предопределяя постепенное наращивание суши [2]. Однако эта тенденция осуществляется лишь при достаточном количестве наносов на соответствующем подводном береговом склоне. Периодические колебания уровня приливного моря и приливно-отливные течения приводят к формированию иного по сравнению с бесприливными условиями профиля равновесия наносов на подводном береговом склоне, который непрерывно смещается, перестраивая профиль склона и предопределяя перемещение зон транзита береговых наносов, соответственно меняя положение береговой линии [11].

В районе Морондава на протяжении более 100 лет регистрируется отступление берега, представленного в настоящее время широким (до 200 м) песчаным пляжем (рис. 2).

Строительство здесь волноломов и бун, начавшееся со средины XX в., лишь на короткое время задержали морскую эрозию, или деррубцию (исп. derrubio — подмыв, размывание) сопредельной суши [35]. Без должного эффекта оказалось укрепление некоторых участков берега защитными стенками с применением габионных конструкций. Поэтому неоднократно обсуждался вопрос о переносе вглубь суши расположенного по границе с пляжем г. Морондава с населением около 40 тыс. (рис. 3), но решение откладывалось в связи с неоднозначным прогнозом развития берега.

Город возник в пределах дельты одноименной реки на месте небольшого рыбацкого поселения, которое стало разрастаться в связи с привлекательностью его окрестностей, развитием пляжно-купального отдыха и организацией туризма. На сегодняшний день, насколько нам известно, не существует какой-либо научной работы о перспективах развития района или обоснованных предложений по оптимизации управления его прибрежной зоной.

Авторы на основе анализа геолого-геоморфологических и неотектонических условий района, особенностей его палеогеографии в позднем неоплейстоцене—голоцене, гидрологического режима сопредельной акватории, принятой концепции о современной кинематике морского уровня и применения оригинальных методических приемов по изучению морфолитодинамики береговой зоны предлагают свое видение развития исследуемого района по природному сценарию.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА

Геолого-геоморфологическая обстановка. Остров Мадагаскар образовался как фрагмент Африкано-Аравийской платформы суперконтинента Гонлвана вслелствие его распала [19, 31]. Он отделился в результате рифтогенеза и заложения в верхнем карбоне-перми [14], либо в раннем [23, 29] или позднем [34] лейасе Мозамбикского пролива. сопровожлавшимися разломами по обеим его сторонам. Осадочный чехол пролива в основании геологического разреза представлен континентальными терригенными образованиями предположительно ледникового генезиса, а выше прослеживаются терригенно-морские песчано-глинистые толщи, перекрытые терригенно-карбонатными и терригенными слоями. Современная структура пролива и его обрамления сформировались в неотектонический период, наступивший в регионе в позднем палеогене [1]. Исследуемый район соответствует средней части Морондавского осадочного бассейна (рис. 4), выполненного отложениями верхнего карбонакайнозоя мощностью до 6-9 км [10, 38].

Верхний карбон представлен континентальными образованиями предположительно ледникового генезиса (формация карру), залегающими на блоковой структуре докембрийского кристаллического фундамента, сформированного преимущественно парагнейсами. Выше прослеживаются отложения верхнего палеозоя—кайнозоя



Рис. 4. Бассейн Морондава — по [27] упрощенно.

в виде терригенно-морских песчано-глинистых толщ, перекрытых морскими терригенно-карбонатными и терригенными слоями. К предрифтовым отложениям сторонники мезозойского возраста рифтогенеза относят речные песчаники позднего триаса.

Прибрежная полоса суши представлена постмиоценовой слабо наклоненной к морю ступенчатой равниной шириной 30–60 км и высотой до 400 м с чехлом четвертичных, преимущественно аллювиальных, а также аллювиально-морских и морских осадков. В ее мористой зоне доминируют регрессивные аллювиально-морские и морские преимущественно песчаные отложения с примесью глинистой фракции. Равнина густо расчленена речной сетью, берущей начало с горной части соответствующих неотектонических доменов [9, 17, 20, 36].

Постмиоценовая равнина абразионным уступом высотой около 10 м отделена от расположенной мористее низкой приморской аллювиально-морской равнины преимущественной высотой 2-3 м, сформированной на древней дельте р. Морондава. В отдельных местах встречаются возвышенные (до 6-8 м над уровнем моря) участки, акцентируя микронеровности предшествующего субаэрального рельефа. Развитый в ее пределах аккумулятивный чехол в целом сложен регрессивной песчано-глинистой толшей, литологический состав которой меняется от места к месту. Мощность перекрывающих ее голоценовых отложений постепенно возрастает вследствие привноса приливами тонкой вещественной фракции, образуя трансгрессивную составляющую приповерхностного геологического разреза.

Климат. Известно, что климатический фактор играет существенную роль в динамике морских берегов. Особенно заметно это проявляется при его сезонной цикличности, ярко выраженной в исследуемом районе, где он представлен субэкваториальным семиаридным муссонным типом, когда относительно сухой зимний сезон с апреля по ноябрь сменяется влажным летом с декабря по март под влиянием северо-западных муссонов [32, 37, 40]. Сухость зимнего времени обусловлена тем, что юго-восточные пассаты со стороны Индийского океана задерживаются горами, протянувшимися через весь остров с севера на юг. В этот период заметно сокращается поступление в береговую зону терригенного материала и происходит усиление размыва берега под воздействием моря. На рассматриваемой территории преобладают ветры ЮЗ и СЗ направлений.

Проявление неотектонического этапа на Мадагаскаре. Новейшая тектоника и, прежде всего, неотектоническая структура являются индикатором пространственно-временной организации тер-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

риторий и наиболее долговременным фактором в развитии береговой зоны моря. Создав современный структурный каркас приповерхностных горизонтов литосферы и основные черты рельефа, она оказывает существенное влияние на экзогенез БЗМ, контролируя литодинамические процессы, где ослабляя, а где усиливая роль кинематики уровня Мирового океана [3].

Начавшийся в олигоцене неотектонический этап развития Мадагаскара проявился в активизации его поднятия при широком проявлении дифференцированной блоковой тектоники [1, 211. в то время как в предшествующий эоценовый период он представлял собой относительно плоский остров небольшой высоты, окруженный широкими карбонатными платформами со слабо расчлененным рельефом [20]. В конце среднего и позднего миоцена, особенно в последние 10 млн лет, произошел пароксизм поднятия и деформаций, сопровождавшийся наклоном западной окраины острова, где расположен район Морондава, увеличением в этом направлении терригенных отложений и формированием четырех поверхностей выравнивания, отражающих неравномерную интенсивность деформаций. Величина полнятия отлельных территорий может быть оценена на основе современной высоты сохранившихся в них морских палеоцен-эоценовых отложений за вычетом высоты предшествующего уровня моря [20]. В результате поднятия резко усилились карстовые и эрозионные процессы, созлавшие густо расчлененный рельеф с амплитудами в десятки - первые сотни метров. Оригинальные формы карстового рельефа - цинжи (малагас. tsingy — цепь, "там, где нельзя ходить босиком") с глубиной расчленения исходной карбонатной поверхности, местами превышающей 70 м [39], образуют каменные леса (рис. 5).



Рис. 5. Каменный лес Мадагаскара (фото из открытых источников).

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

Кинематика уровня моря. В настоящее время среди исследователей нет единого представления об особенностях послеледниковой трансгрессии уровня моря, особенно за последние 5-6 тыс. лет, как по отношению к Мировому океану в целом, так и к отдельным его регионам в частности. Так, например, одни исследователи утверждают, что уровень моря в середине этого периода превышал современный на несколько метров, другие полагают, что он либо достиг современных отметок к этому времени, а потом лишь колебался в незначительных пределах, либо асимптотически приближался к современному. Нет единства в представлениях и о современной долгосрочной его кинематике, особенно в связи с дискуссией о проблеме глобального потепления климата. Тем не менее принятие той или иной концепции кинематики уровня Мирового океана за период последних нескольких тысячелетий определяет понимание тенденций развития зоны взаимодействия моря и суши и отражается на оценках перспектив освоения приморских территорий в виде разного рода строительства, организации курортных зон, туризма и др. Изучение характера постледниковой трансгрессии в западном регионе Индийского океана, в том числе и в районе о. Мадагаскар показало, что уровень моря сколько-либо заметно не превышал современный [26 и др.]. По данным ряда исследователей, он приблизился к современному 3-2.5 тыс. л. н. и стабилизировался, испытывая лишь небольшие сезонные и погодно-синоптические колебания в пределах первых десятков сантиметров [18]. Наши исследования в других регионах [22] согласуются с этими выводами и дают основание предполагать, что, по крайней мере, в XXI в. кинематика уровня моря существенно не изменится.

Береговая зона. Берег Морондава относится к аккумулятивному размывающемуся типу. Непосредственно к урезу воды подходит песчаный пляж, сложенный от места к месту в разных пропорциях терригенным литогенным и карбонатным морским (ракушечный детрит и рифогенный материал) песком преобладающей размерности 0.20-0.25 мм. При этом в целом терригенная составляющая доминирует вследствие ее большего поступления в акваторию и повышенной истираемости морского органогенного материала по сравнению с терригенным. Сопредельный подводный береговой склон — аккумулятивный с осредненным уклоном до 10-метровой изобаты 0.0045, а средний уклон пляжа близок к 0.05. Морской берег, низкая равнина и подводный береговой склон подвергаются воздействию морских приливов и отливов, которые являются регулярными полусуточными с отливами в полдень и полночь. Высота прилива, определяемая разностью отметок уровня высокой и низкой воды (рис. 6), характеризуется следующими значениями: средний прилив — 2.55 м, сизигийный прилив — 3.65 м, экстремальный прилив — 4.75 м при средней скорости приливов 43 км/час [25, 33].

При таких приливах низкая равнина затапливается вплоть до ее тылового шва, расположенного у подножия упомянутого уступа. Приливы сопровождаются течениями, которые в южном полушарии согласно силе Кориолиса отклоняются влево от динамической оси потока. В районе Морондава их вектор направлен на север. Действие прилива обычно не нарушает характер протекающих морфодинамических процессов, определяемых волнением. Доказательством служит наличие систем подводных валов с примерно одинаковыми свойствами, наблюдаемыми в условиях как высоких, так и низких приливов [7].

Волновой климат района характеризуется доминированием волн зыби, приходящей с ЮЗ румба и в меньшей степени с СЗ направления. Высота волн чаще всего в пределах 2 м, но в течение нескольких дней в году может превышать 3 м. Период зыби обычно не менее 14 с [33]. При том, что гравитационные волны играют полчиненную роль в динамике берега с приливными берегами, их действие обусловливает развитие мощных вдольбереговых потоков наносов, в основном в северо-восточном направлении, характеризующихся величиной порядка 500 тыс. м³/год [35]. При этом волны ЮЗ направления распространяются под значительным углом к береговой нормали и относятся к категории так называемых «волн больших углов» (high-angle waves). Подобные волны провоцируют неустойчивость контура берега и развитие ритмических форм рельефа типа песчаных волн или кос [16]. Действительно, серии песчаных кос наблюдаются на космических снимках берега севернее г. Морондава (рис. 7).

На динамику берега значительное влияние оказывают тропические циклоны, сопровождающиеся штормовыми нагонами и штормовыми

волнениями. В сочетании с приливами такие циклоны приводят к затоплению низкой террасы, располагающейся за береговым валом. В районе г. Морондава это приводит к катастрофическим последствиям. Помимо собственно затопления происходит размыв пляжа и берегового вала, что приводит к постепенному отступлению береговой линии в сторону суши со скоростью до нескольких метров в год [33, 35]. При этом на прилегающих территориях побережья негативных процессов не наблюдается.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Строение берегов района Морондава и их динамика изучены по топографическим картам масштаба 1 : 200000 (состояние местности на 1981 г.) и космическим снимкам (КС) Landsat ETM + съемки 2000–2001 гг. (разрешение 15 м). Детали строения берегов уточнены по КС QuickBird (разрешение 0.7–2.9 м, состояние местности на 2013 г.), содержащимся в интернет-ресурсе Google Earth. При дешифрировании КС учитывалось фаза приливно-отливных колебаний (расчетные данные программы WXTide32).

Для иллюстрации тенденций развития берега в районе г. Морондава было проведено моделирование совместного воздействия волн, прилива и штормового нагона на профиль пляжа с помощью модели CROSS-PB [8].

Картографическая модель новейшей тектоники района и сопредельных прибрежных территорий построена по структурному принципу как в наибольшей мере отвечающему поставленной задаче. Для этого был применен структурно-геоморфологический анализ гипсометрических карт суши и сопредельного шельфа среднего масштаба с учетом особенностей геологического строения и использованием успешно опробированной на практике методики [5, 12, 13]. Теоретической



Рис. 6. Береговой профиль и диапазон приливных колебаний уровня.



Рис. 7. Направление потока береговых наносов в районе Морондава (Google Earth Pro, 5. 1. 2022).

основой анализа является ключевое положение геоморфологии о формировании рельефа Земли в результате взаимодействия эдогенных и экзогенных процессов при ведущей роли тектонических движений. Такой методический подход позволяет изучать закономерные связи форм современного рельефа и экзодинамики земной поверхности с геологическими особенностями и глубинным строением земной коры, выявить их тектономорфные свойства и компоненты, обvсловленные новейшими тектоническими движениями. Эти связи подчеркиваются, в частности, широко распространенной унаследованностью структурных форм и приспособлением экзогенных литодинамических процессов к геологическим неоднородностям субстрата, акцентируя морфологические аспекты земной поверхности в условиях различного проявления неотектоники. В ряду тектонических деформаций особое внимание уделяется картированию линеаментов, отражающих дизъюнктивные дислокации. Наиболее важными по информативности морфометрическими показателями как направленности, так и интенсивности новейших движений в пределах отдельных структурных форм является анализ общего поля высот и глубины расчленения рельефа.

Полученные данные позволяют выявить различно выраженные в рельефе деформации земной коры, как объемно-площадные, так и линейные, образовавшиеся и развивающиеся на неотектони-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

ческом этапе существования острова, в том числе структурные формы, прослеживающиеся в береговую зону не только с суши, но и со стороны акватории. Результат этого анализа дополняется выводами, полученными при дешифрировании современных космоснимков среднего уровня пространственного разрешения семейства Landsat 8 (https://earthexplorer.usgs.gov/), космоснимками высокого и сверхвысокого разрешения с интернет-ресурсов Google Earth (https://earth.google.com/ web/) и Bing (https://www.bing.com/maps). Активность разрывных нарушений определяется по комплексу орографических признаков: деформациям зоны плоскостной денудации, перекосам долин, разделяющих блоки, различиям высот блоков, сложенных породами примерно близкой устойчивости к денудации, или разному их наклону, резкому изменению крутизны склонов и др. Принималось, что речные долины с симметричными бортами соответствуют более древним неразвивающимся на неотектоническом этапе разломам.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На западном побережье о. Мадагаскар орографически выраженные в современном рельефе тектонические деформации представлены блоково-разрывной структурой, созданной вертикальными разломами разного ранга, среди которых доминируют северо-западные направления (рис. 8).



Рис. 8. Новейшая тектоническая структура западной окраины Мадагаскара (составил Н.Н. Дунаев): 1–3 – разрывные нарушения первого — третьего ранга, 4 – граница слабых конэрозионных приморских поднятий; I–VI — неотектонические домены

Менее распространены северо-восточные и субширотные простирания. Примечательно, что указанные направления дизъюнктивных нарушений не рассеяны по площади, а концентрируются на соответствующих им территориях, образуя неотектонические домены, разделенные разломами второго ранга.

Разломы третьего ранга разграничивают блоки с разной высотой или изменением их наклонов. Разлом первого ранга — один из наиболее выразительных на острове, отделяющий западные предгорья центрального горстообразного поднятия, прослеживающегося через Мадагаскар с севера на юг. Резкие, необъяснимые литологическими причинами сужения и расширения современных речных долин, изменения характера их вреза, общего строения и деформации поверхности, расщепление и появление ступенчатых уступов речных террас свидетельствуют о том, что на побережье района происходят современные тектонические движения.

Исследуемый район находится в пределах относительно опущенного блока неотектонического домена III, которому соответствует наиболее низменный сегмент западного побережья. Прослеживающиеся к берегу разломы предопределяют направление речной сети, которая обеспе-

чивает поступление в береговую зону участка Морондава аллювиального материала. Глубину осложняющих домен тектонических разломов можно определить по методике И.С. Шермана [15], согласно которой они в целом характеризуются коровым заложением. Следует отметить, что низменный равнинный рельеф не свидетельствует о тектоническом покое территории, поскольку возможна полная компенсация поднятия денудацией, а опускания — аккумуляцией. Обнаруженные в этом районе многочисленные разрывные нарушения позволяют предположить, что район подвергся значительным тектоническим нагрузкам. Влияние неотектоники на линамику береговой зоны прослеживается с момента ее становления, определяемого относительной стабилизацией уровня моря и внешней границы. В исследуемом районе этот период начался 3.5 т. л. н.

Проведенные исследования позволили подразделить морской берег района Морондава на генетически разнородные участки и определить, что его современная динамика, определяемая сочетанием ветро-волновой нагрузки, высоких приливов и режима поступления аллювиального материала, характеризуется значительными изменениями контура берега по нормали и латерали (рис. 9).

Приливный фактор в динамике береговой зоны более значим по сравнению с ветро-волновым, так как, в отличие от последнего, действует постоянно, и к тому же установлено, что морские волны доминируют при высоте приливов не более 2 м.

Согласно результатам моделирования, выполненного при допушении однородности осадков на профиле (рис. 10), в случае умеренной зыби изменений пляжа практически не происходит (рис. 10а). Иначе говоря, профиль пляжа находится в равновесии с доминирующим волновым режимом. Условия прохождения тропического циклона, когда развивается штормовое волнение и возникает нагон. накладывающийся на прилив. имитирует рис. 10б. При таком варианте отмечается размыв пляжа вблизи максимальных отметок уровня и аккумуляция смытого материала в нижней части пляжа. Штормовое воздействие на пониженный участок берегового вала, когда при высокой воде возможен перелив воды через его гребень, отражает рис. 10в, где показаны изменения профиля вала после прохождения двух последовательных тропических циклонов.

В результате высота вала уменьшается, его вершина смещается в сторону суши, а смытый материал перемещается как на фронтальный, так и на тыловой склоны вала.

Судя по результатам расчетов, размыву подвержена, главным образом, верхняя часть



Рис. 9. Типы береговых участков и динамика береговой линии района Морондава (составила Т.Ю. Репкина). Типы берегов: 1 – аккумулятивно-абразионные, выработанные в песчаных отложениях морских террас; аккумулятивные: 2 – лагунные, 3 – лагунные, бронированные коралловой платформой, 4 – дельтовые. Динамика береговой линии за 1981–2001 гг. (цифры — максимальная величина смещения на участке, м): 5 – смещение вдоль берега, 6 – отступание, 7 – выдвижение; 8 – границы участков. Черными стрелками показано положение уступа, отделяющего приморскую аллювиально-морскую равнину от аллювиальных равнин, синей стрелкой — подтопленный участок дельты р. Морондава.

пляжа и берегового вала. Учитывая, что реально в теле берегового вала и пляжа значительную долю составляют мелкие частицы, легко подверженные безвозвратному выносу за пределы береговой зоны, каждый очередной циклон может приводить к понижению берегового вала в целом и отступанию береговой линии. Следует также принять во внимание вынос отложенного у берега материала на подводный склон и вдоль уреза воды вследствие периодических и неволновых течений, связанных с трансформацией энергии ветровых волн, нагонами, приливами.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные литодинамические процессы в береговой зоне района Морондава представлены размывом, перемещением и меняющейся от места к месту кратковременной аккумуляцией наносов. Размыв берега и наводнения в г. Морондава определяются комплексом естественных и антропогенных факторов: отмеченное выше неотектоническое положение района, прекращение функционирования одного из важных рукавов в дельте реки Морондавы, изъятие песка с пляжа



Рис. 10. Моделирование изменений профиля берега при воздействии волнения, прилива и нагона. Продолжительность воздействия 24 ч, направление волн относительно береговой нормали 40° (составил И.О. Леонтьев). (а) – умеренная зыбь (значительная высота 2 м, период пика спектра 14 с) на фоне сизигийного прилива (максимальный уровень +1.8 м): I u 2 - ucxoдный и финальный профили (б) – штормовое волнение (высота 4 м, период 10 с) на фоне прилива и нагона. Об м. 3 и 4 – финальные профили в случаях сизигийного и экстремального приливо (соответствующие максимальные уровни +2.6 и +3.8 м); (в) – воздействие штормового волнения на фоне прилива и нагона на пониженный участок берегового вала: <math>5 u 6 - финальные профили после прохождения одного и двух последовательных штормов (максимальный уровень +3.1 м).

при строительстве города и разные формы механического повреждения пляжа, приводящие к измельчению песка и, как следствие, выносу его ветром и морем, зарегулированный сток одноименной реки в районе г. Дабара и недостаточно обоснованная система удерживающих конструкций. которые могли бы задерживать деррубцию берега и ограничивать вынос пляжеобразующего материала в северном направлении. Помимо этого, был существенно расширен судоходный канал к порту, расположенному в тыловой части города, вследствие чего уровень грунтовых вод повысился и территория города, расположенная между морем и каналом, стала испытывать оседание. Негативную роль играет и то обстоятельство, что расположенный в тыловой части пляжа береговой вал, за которым располагается низкая терраса, сложен материалом, в составе которого значительную долю составляют мелкие частицы, которые легко выносятся из береговой зоны, а не сохраняются на пляже, поддерживая его устойчивость [35]. В условиях значительных приливных колебаний уровня моря применяемая в районе защита открытого песчаного берега бунами едва ли может быть успешной. Строительство стенок, габионных конструкций способно дать кратковременный положительный эффект, но уже в ближайшем от их возведения времени они, как правило, становятся главной причиной деградации и исчезновения пляжей.

Согласно природному сценарию, развитие аккумулятивного берега стремится к выравниванию по нормали к направлению морского волнового воздействия. Но реально в пределе, как правило, формируется плавная синусоида береговой линии вследствие локальных условий. Поэтому ее переменная от места к месту фрагментарная неустойчивость неизбежно будет сохраняться, но при достаточных запасах песка не нарушит общий фон пляжа. Для района Морондава можно констатировать, что в настоящее время отмечается тенденция к срезанию берега, как и сопредельных дельт выдвижения, перераспределению наносов в пространствах между ними и по направлению к дисталям кос-баров, формирующихся вдольбереговыми потоками наносов (рис. 7). Это ведет к выравниванию береговой линии при общем ее отступлении и приближению берега к стадии зрелости с существенным сокращением ширины пляжа. В настоящее время пляж после некоторых штормов возвращается к исходному состоянию вследствие того, что не происходит необратимых изменений в балансе береговых наносов. Такая ситуация создает иллюзию перспективной устойчивости берега Морондавы.

От катастрофического размыва берега Морондавы пока спасает значительный запас песчаного ундалювиального материала. Но его количе-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

ство снижается в связи с истиранием и выносом из приурезовой зоны, уменьшением поступления вследствие сокращения запасов песка на подводном береговом склоне в результате его предшествующего многолетнего выноса к берегу морскими волнами и при относительных понижениях уровня моря в фазы отлива, в результате истощения кор выветривания сопредельной суши, активно дренируемых на протяжении неотектонического этапа, зарегулированным стоком одноименной реки в районе г. Дабара, неэффективной системы удерживающих песок береговых сооружений, а также вследствие реконструкции упомянутого судоходного канала. Развитие мангровых зарослей при водотоках приурезовой зоны и продвижение их в море южнее исследуемого района тоже сокращает поступление береговых наносов с этого направления.

Теоретические основы гидродинамики береговых зон приливных морей в целом, как и учет региональных условий, находятся еще в стадии разработки. Поэтому задача защиты берега и уточнения прогноза его развития в районе г. Морондава требует дальнейших натурных исследований. В их числе необходимо определить ширину зоны вдольберегового потока наносов, запасы пляжеобразующего материала на подводном береговом склоне и бюджет береговых наносов в целом [6], изучить проблему региональной трансформации ветровых (гравитационных) волн в другие формы прибрежной циркуляции, промоделировать варианты берегозащитных сооружений, устранить дальнейшее антропогенное воздействие, подобрать вегетативные формы защиты пляжа. Также будут весьма полезны рекомендации отечественных специалистов по Правилам проектирования инженерной защиты берегов приливных морей [4]. Ориентироваться только на искусственную подпитку пляжа будет экономически дорого и в перспективе малоэффективно, а продолжение строительства каменных бун в условиях высокоприливных берегов района Морондава может быть вредным.

Источники финансирования. Работа выполнена в соответствии с темами госзадания ИО РАН FMWE-2021-0004, ГЗ ИГ РАН FMGE-2019-0005 (геоморфологические исследования) и при поддержке РФФИ (грант 13-05-00589).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Божко Н.А., Брянцева Г.В. Морфоструктуры Мадагаскара и их взаимоотношение с геологическим строением // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2016. № 4. С. 15–22.
- 2. Долотов Ю.С. Процессы рельефообразования и осадконакопления на приливных побережьях Мирового океана. М.: Научный мир, 2010. 180 с.

- Дунаев Н.Н. Новейшая тектоника как важнейший компонент морфосистемы морской береговой зоны // Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности: Материалы XXIII Междунар. береговой конфер. в честь столетия со дня рождения профессора В.П. Зенковича. СПб, 2010. С. 203–204.
- Инженерная защита берегов приливных морей. Правила проектирования. М.: Мин-во строительства и ИКХ РФ. 2017. 44 с.
- 5. Костенко Н.П., Макарова Н.В., Корчуганова Н.И. Выражение в рельефе складчатых и разрывных деформаций. М.: МГУ, 1999. 120 с.
- 6. Леонтьев И.О. Бюджет наносов и прогноз развития берега // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 467–476.
- 7. Леонтьев И.О. Подводные валы на песчаных берегах// Океанология. 2011. Т. 51. № 1. С. 146–152.
- Леонтьев И.О. Динамика берегового профиля с подводными валами в масштабе штормового цикла // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 805–813.
- 9. Мадагаскар. М.: Прогресс, 1990. 294 с.
- Махефарисон В.Р. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности впадины Мурундава (остров Мадагаскар). Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 04.00.17. Баку: АзИНЕФТЕХИМ, 1990. 20 с.
- Медведев В.С. Особенности морфо- и литодинамики береговой зоны приливного моря // XXIII Международный Географический конгресс. Симпозиум "Динамика морских берегов". Тез. докл. Тбилиси: Мецниерба, 1976. С. 85–87.
- 12. Никифоров Л.Г. Морфоструктурный анализ морских побережий. М.: МГУ, 1975. 175 с.
- Применение геоморфологических методов в структурно-геологических исследованиях / И.П. Герасимов (ред.). М.: Недра, 1970. 296 с.
- 14. *Хаин В.Е., Лимонов А.Ф.* Региональная геотектоника (тектоника континентов и океанов): Тверь: ООО "ГЕРС", 2004. 270 с.
- Шерман С.И. Тектонофизические параметры разломов литосферы, избранные методы изучения и примеры использования // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы первой молодежной школы семинара. М.: ИФЗ, 2009. С. 302–318.
- Ashton A.D., Murray A.B. High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits and capes // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. F04012.
- 17. *Battistini R., Hoerner J.M. Géographie de Madagascar.* Paris: SEDES, 1986. 187 p.
- Camoin G.F., Montaggioni L.F., Braithwaite C.J.R. Late Glacial to Post Glacial Sea-Levels in the Western Indian Ocean // Marine Geology. 2004. V. 206. P. 119–146.
- 19. Collins A.S. The Tectonic Evolution of Madagascar: Its Place in the East African Orogen // Gondwana Research. 2000. V. 3. № 4. P. 549–552.

- Delaunay A.D., Robin C., Guillocheau F. et al. Mid to Late Miocene Uplift and Doming of Madagascar: Constraints from Topography, Cenozoic Stratigraphy and Paleogeography// Conference: Third EAGE Eastern Africa Petroleum Geoscience Forum. Mozambique, Maputo: 7–9 November, 2017. P. 1–2.
- 21. *Delaunay A*. Les mouvements verticaux de Madagascar (90–0 Ma): Une analyse couple des formes du relief et de l'enregistrements dimentaire des marges oust malgaches. Ph.D. thesis, University de Rennes 1, 2018.
- Dunaev N., Repkina T. Accumulative coasts as reliable indicators of the kinematics of the sea level during the Holocene // Proceedings of International Conference "Managing risks to coastal regions and communities in a changing world" (EMECS'11 – SeaCoasts XXVI). St. Petersburg: RGGU, 2017. P. 161–171.
- 23. Geiger M., Clark D.N., Mette W. Reappraisal of the Timing of the Breakup of Gondwana Based on Sedimentological and Seismic Evidence from the Morondava Basin, Madagascar // Journal of African Earth Sciences. 2004. V. 38. № 4. P. 363–381.
- 24. https://ru.maps-madagascar.com/Мадагаскар-карты-высот, посещение 10.06.2023.
- 25. https://www.findtide.com → 1191.html; Morondava Tide table FINDTIDE.com
- Kaplin P., Pirazzoli P.A., Pavlidis Y., Badenkov Y. Sealevel and environmental changes in shelf areas of the western Indian Ocean // J. Coastal Res. 1986. V. 2. N
 № 3. P. 363–367.
- Lawver D.R., Rasoamiaramanana A.H., Werneburg I. An occurrence of fossil eggs from the mesozoic of Madagascar and adetailed observation of eggs hell microstructure // Journal of Vertebrate Paleontology. 2015. V. 35. № 5. P. e973030.
- Mentaschi L., Vousdoukas M.I., Pekel J.F. et al. Global long-term observations of coastal erosion and accretion // Scientific Reports. 2018. V. 8. P. 12876.
- 29. *Moulin M., Aslanian D., Evain M. et al.* Gondwana breakup and passive margin genesis: Messages from the Natal Valley // Terra Nova. 2020. V. 32. № 3. P. 205–214.
- 30. Paskoff R. Côtes en danger. Paris: Édit. MASSON, 1993. 247 p.
- 31. *Piqué A*. The geological evolution of Madagascar: an introduction // Journal of African Earth Sciences. 1999. V. 28. № 4. P. 919–930.
- 32. Raholijao N., Arivelo T.A., Rakotomavo Z.A.P.H. et al. Les tendances climatiques et les futurs changements climatiques a Madagascar-2019. Government of Madagascar, Antananarivo, Madagascar [online] URL: https://www. primature.gov.mg/cpgu/wp-content/uploads/2019/11/ Publication_FR_09_Sept_Version_Finale.
- Randriatefison N., Andrianaharison Y. Dynamics of the ocean of Morondava // Conference in High-Energy Physics (HEPMAD-19). Madagascar-Antananarivo (14-20 October, 2019). 6 p.
- Razafimbelo E. Le bassin de Morondava (Madagascar). Synthèse géologique et structural. Thèse de Doct. Ingénieur. Université Louis, France, 1987. 241 p.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

- Razafimbelo M.R.I., Mandimbiarison A.J., Rajaona R.D., Rasolomanana E.H. Problematique de l'erosion du littoral de Morondava // Madamines. 2013. V. 5. P. 1–12.
- Salomon J.-N. L'accrétion littorale sur la côte Ouest de Madagascar // Geographie Physique Environment. 2009. V. 3. P. 35–59.
- 37. Tadross M., Randriamarolaza L., Rabefitia Z., Zheng K.Y. Climate change in Madagascar; recent past and future // Climate Systems Analysis GrouP. Washington, D.C., USA. 2008. 17 p.
- 38. *Tucker R.D., Roig J.Y., Moine B. et al.* A geological synthesis of the precambrian shield in Madagascar // Journal of African Earth Sciences. 2014. V. 94. № 2. P. 9–30.
- 39. Veress M., Lóczy D., Zentai Z. et al. The origin of the Bemaraha tsingy (Madagascar) // International Journal of Speleology. 2008. V. 37. № 2. P. 131–142.
- 40. Weiskopf S.R., Cushing J.A., Morelli T.L., Myers B.J.E. Climate change risks and adaptation options for Madagascar // Ecology and Society. 2021. V. 26. № 4. P. 36.

STATE AND FORECAST OF THE DEVELOPMENT OF THE SHALLOW SANDY COAST OF THE TIDAL SEA (ON THE EXAMPLE OF MADAGASCAR)

N. N. Dunaev^{a, #}, I. O. Leont'yev^a, and T. Yu. Repkina^{a, b}

^aShirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia ^bInstitute of Geography RAS, Moscow, Russia [#]e-mail: dunaev@ocean.ru

Currently, most seashores are experiencing increased erosion and retreat. To a large extent, this applies to coasts subject to the influence of high-amplitude sea tides, which is extremely negatively manifested on the accumulative coasts of oceanic islands. The solution of the problem of their dynamics, the theoretical foundations of which are still in the development stage, can be based only on the basis of wide-regional studies. This work is aimed at elucidating the features of the dynamics of such a coast using the example of a key region of a large oceanic island. The main reasons for its degradation are identified, recommendations are given for stabilizing the coastline, and the development trend according to the natural scenario is considered.

Key words: tidal sea, the coastal zone, neotectonics, geomorphology, modeling

———— ИНФОРМАЦИЯ ———

УДК 556.54

ИССЛЕДОВАНИЯ СЕРОВОДОРОДНОГО ЗАРАЖЕНИЯ ПРИДОННОГО СЛОЯ СРЕДНЕГО КАСПИЯ В РЕЙСЕ НИС "ИССЛЕДОВАТЕЛЬ КАСПИЯ" В СЕНТЯБРЕ 2022 г.

© 2024 г. Л. А. Духова^{1*}, А. С. Суворова¹, А. К. Грузевич¹, Е. В. Оганесова¹, А. Д. Кудяков²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия ²Волжско-Каспийский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства

> и океанографии, Астрахань, Россия *e-mail: dukhova@vniro.ru Поступила в редакцию 15.04.2023 г. После доработки 24.04.2023 г. Принята к публикации 18.07.2023 г.

Представлена информация о комплексных исследованиях гидролого-гидрохимической структуры вод Северного и Среднего Каспия на НИС "Исследователь Каспия" в сентябре 2022 г. Показано, что, несмотря на продолжающееся снижение уровня моря, аэрация глубинных слоев отсутствует, сероводородный слой сохраняется с тенденцией увеличения концентрации сероводорода в придонном слое, наблюдается увеличение толщины слоя с минимальным содержанием кислорода. Происходящие изменения в экосистеме Каспийского моря привели к ослаблению выноса биогенных элементов из фотического слоя в придонные слои и, как следствие, уменьшению концентрации кремния в придонном слое. Полученные результаты позволят оценить тенденции происходящих изменений.

Ключевые слова: Каспийское море, глубоководная котловина, гипоксия, сероводородный слой **DOI:** 10.31857/S0030157424020131 **EDN:** RUCVKG

В период с 11 по 17 сентября 2022 г. в рейсе НИС "Исследователь Каспия" была выполнена традиционная океанографическая съемка Северного и Среднего Каспия в рамках выполнения программы мониторинга экологического состояния Каспийского моря. На рис. 1 приведен район исследований, который охватывал различные части акватории Каспийского моря от прибрежных отмелей до глубоководных впадин. Исследования проводились по классической схеме на 22 океанологических станциях, расположенных на 4 "вековых" разрезах (рис. 1а).

В экспедиции получены современные данные по вертикальному распределению гидролого-гидрохимических параметров на «вековых» разрезах, развитию гипоксии и динамике содержания сероводорода в глубинных водах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для зондирования водной толщи и отбора проб воды использовалась розетта с 12 батометрами Нискина объемом 5 литров каждый, на которой был установлен зонд SeaBird SBE 19 plus. По результатам зондирования были получены непрерывные вертикальные профили температуры, солености, рН, содержания растворенного кислорода, относительного насыщения вод кислородом и интенсивности флюоресценции фитопигментов. Для исследования развития гипоксии и сероводородного заражения в глубинных водах были отобраны пробы, в которых спектрофотометрическим методом по реакции с диметил-п-фенилендиамином определяли содержание сероводорода [2]. Гидрохимические определения содержания биогенных элементов выполняли спектрофотометрическими методами. принятыми при анализе морских вод [2]. Содержание растворенного органического углерода (РОУ) в пробах определялось методом каталитического высокотемпературного сжигания при 680°С на приборе Shimadzu TOC-Vcph в стационарной лаборатории ФГБНУ "ВНИРО".

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экосистема Среднего Каспия переживает в настоящее время сложные времена. Уровень



Рис. 1. Расположение гидрологических станций (а) и распределение растворенного кислорода и сероводорода на ст. 5 на разрезе п. Дивичи-б. Кендерли (б) в рейсе НИС "Исследователь Каспия" 11–17.09.2022 г.

Каспийского моря продолжил тенденцию снижения и в июне 2022 г. составил –28.51 м (–28.26 м в 2021 г.). Резкое падение уровня на 0.2 м также произошло в 2021 г. по сравнению с 2020 г. Существует связь между уровнем Каспийского моря, термохалинной структурой и вертикальной гидролого-гидрохимической структурой вод глубоководных котловин.

Результаты исследований, проведенных в 2022 г., показали, что развитие гипоксии в глубинных водах Среднего Каспия и накопление сероводорода в придонном слое продолжаются. Глубоководная область Среднего Каспия по вертикали делится на две зоны — аэробную и анаэробную или зону с минимальным содержанием кислорода. Это обусловлено устойчивой стратификацией вод, приведшей к изоляции глубинных вод и длительному отсутствию их аэрации.

Аэробная зона располагается от поверхности до 400 м. Максимальное содержание растворенного кислорода характерно для верхнего 100-метрового слоя. С глубиной насыщение вод кислородом снижается (рис. 16) и уже на 400 м концентрация растворенного кислорода составила 0.47 мл/л (5.4%), а на 600 м кислород отсутствовал. В анаэробной зоне резко возрастала ко дну концентрация сероводорода (рис. 16). Максимальное содержание сероводорода, отмеченное в придонном слое Дербентской котловины Среднего Каспия в сентябре 2022 г., составляло 1.17 мл/л. Таким образом, концентрации сероводорода в придонных водах Дербентской котловины значительно возросли по сравнению с со-

держанием сероводорода в июле-августе 2019 г., составляющим 0.57 мл/л [3], и превысили значения, отмеченные Книповичем (1919 г.) и Бруевичем (1937 г.) в 4 раза. Процессы деструкции органического вещества в Среднем Каспии, начиная с 400 м, происходят при почти полном отсутствии кислорода за счет бактериального окисления нитратами и сульфатами, что и приводит к накоплению продуктов нитрат и сульфат редукции.

Слой нитратного максимума располагался на горизонтах 200—300 метров. В придонных водах нитраты отсутствуют, что происходит в результате процессов денитрификации (нитрат редукции), при которых азот используется в качестве акцептора электронов для окисления органических соединений. В придонных анаэробных водах минеральный азот восстановлен до иона аммония, концентрации которого в самых глубоких точках достигали 5.5 мкМ.

В поверхностном и подповерхностном слое в сентябре 2022 г. концентрация кремния не превышала 10 мкМ. В придонных слоях глубоководной котловины (ст. 5 разреза п. Дивичи-б. Кендерли) шло накопление растворенного кремния, концентрация которого достигала 145 мкМ. В сентябре 2013 г. концентрация кремния в придонном слое Дербентской котловины достигала 180 мкМ [1]. Активное потребление биогенных веществ в фотической зоне различными видами фитопланктона, не включенными в трофические цепи, в основном *Pseudosolenia calcar avis*, было характерно для экосистемы Каспийского моря в 2000-х гг., что приводило к выносу этих соедине-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

ний в составе детрита в придонные слои. В 2021 г. по биоразнообразию и массе клеток стали доминировать зеленые и динофитовые водоросли. Вероятно, снижение количества *Pseudosolenia calcar avis* повлияло на накопление кремния в придонном слое и уменьшение его содержание в 2022 г.

Концентрация растворенного органического углерода (РОУ) в Среднем Каспии изменялась в поверхностном слое от 9.5 до 24.9 мг/л, в придонном — от 8.9 до 9.6 мг/л. Наблюдалось локальное увеличение содержания РОУ в подповерхностном слое (50 м) в Дербентской котловине. На границе Среднего и Северного Каспия (разрез о. Чечень-м. Урдюк) в поверхностном слое концентрации органического углерода максимальные, что связано с влиянием трансформированных волжских вод.

По результатам экспедиционных исследований подготовлена электронная база гидрохимических данных, включающая показатели, характеризующие развитие гипоксии в придонных слоях. Дальнейшее падение уровня моря может привести к нарушению устойчивой стратификации вод, аэрации глубинных слоев и разрушению сероводородного слоя.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят научную группу ФГБНУ "КаспНИРХ" и экипаж НИС "Исследователь Каспия" за помощь в проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Духова Л.А., Серебренникова Е.А., Амбросимов А.К. и др. Гидрохимические исследования глубоководных котловин Каспийского моря в августе-сентябре 2013 г. на научно-исследовательском судне "Никифор Шуреков" // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 162–164.
- Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Под ред. Сапожникова В.В. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
- Торгунова Н.И., Аржанова Н.В., Хурсанов А.С. и др. Гидролого-гидрохимические исследования в Среднем Каспии в июле-августе 2019 г. // Труды ВНИРО. 2020. Т. 180. С. 174–178.

STUDIES OF HYDROGEN SULFIDE CONTAMINATION OF THE DEEP-WATER BASIN OF THE MIDDLE CASPIAN SEA DURING CRUISE OF THE R/V "ISSLEDOVATEL KASPIYA" SEPTEMBER 2022

L. A. Dukhova^{*a*, #}, A. S. Suvorova^{*a*}, A. K. Gruzevich^{*a*}, E. V. Oganesova^{*a*}, and A. D. Kudyakov^{*b*}

^a Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russia ^bVolga-Caspian Branch of the Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography, Astrakhan, Russia [#]e-mail: dukhova@vniro.ru

Results of the comprehensive studies of hydrological and chemical structure of the Middle and Northern Caspian Sea carried out aboard r/v "Issledovatel Kaspiya" in September 2022 are presented. It is shown, despite the continuing decrease in sea level, there is no aeration of the deep layers, the hydrogen sulfide layer persists with a tendency to increase the concentration of hydrogen sulfide in the bottom layer. There is an increase of the oxygen minimum zone. The changes of the Caspian Sea ecosystem have led to a weakening of the removal of nutrients from the photic layer into the bottom layers and, as a consequence, a decrease in the concentration of silicon in the bottom layer. The results obtained will allow to evaluate the trends of ongoing changes.

Key words: Caspian Sea, the deep-water basin, hypoxia, the layer of hydrogen sulfide contamination

— ХРОНИКА =

БОРИС НИКОНОРОВИЧ ФИЛЮШКИН (К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)



13 декабря 2023 г. исполнилось 90 лет старейшему члену редколлегии журнала «Океанология», доктору географических наук, главному научному сотруднику Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН Борису Никоноровичу Филюшкину.

В 1956 г. Борис Никонорович с отличием окончил Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова по кафедре океанологии. После стажировки в Югославии (в институте Океанографии и Рыболовства в г. Сплите) он в 1957 г. поступил на работу в Институт океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР, и с этим Институтом вот уже шестьдесят шесть лет связана его научная жизнь.

Первые годы своей работы в отделе Физической океанографии Борис Никонорович посвятил изучению гидрофизического режима Средиземного моря. В дальнейшем его научные интересы были связаны с экспериментальными и теоретическими исследованиями динамической и термической структуры деятельного слоя Мирового океана. В начале 1960-х гг. в Институте океанологии при его активном участии создается межлабораторная группа по исследованию взаимодействия океана и атмосферы, ставшая в 1970 г. самостоятельной лабораторией. В лаборатории были развиты оригинальные методы изучения взаимодействия пограничных слоев атмосферы и океана с помощью стабилизированных по вертикали буев. Б.Н. Филюшкину удалось впервые проследить временную эволюцию спектров температуры в сезонном термоклине и получить прямое свидетельство образования температурных инверсий при разрушении внутренних волн.

Существенный вклад Б.Н. Филюшкин внес в исследование термодинамического режима вод Тихого океана. Им впервые были получены представления о внутригодовой пространственно-временной изменчивости сезонного термоклина, пикноклина и галоклина. Результаты этих исследований вошли в монографию "Гидрология Тихого океана" 1966 г. При участии Б.Н. Филюшкин была создана оригинальная модель расчета сезонной изменчивости верхнего термоклина.

Большой цикл работ Б.Н. Филюшкина посвящен экспериментальному исследованию колебаний температуры вод Мирового океана в диапазоне частот внутренних гравитационных волн, им впервые установлены общие закономерности распределения внутренних волн по частотам.

С 2010 г. интересы Бориса Никоноровича связаны с изучением формирования и эволюции внутритермоклинных линз средиземноморского происхождения в Северной Атлантике. Им выполнены модельные эксперименты, показаны закономерности отражения линз на поверхности океана, взаимодействия линз между собой и с крупномасштабными течениями и вихрями. Показана определяющая роль средиземноморского бассейна и Датского пролива в формировании промежуточной водной массы Атлантического океана, изучены сезонная и межгодовая изменчивость этого процесса и определена его связь с возмущениями индекса Северо-Атлантического колебания.

Борис Никонорович участвовал в более чем двадцати экспедициях в Тихом, Атлантическом и Индийском океанах, Баренцевом, Черном, Каспийском и Средиземном морях. Как организатор и ученый он внес большой вклад в советскоамериканский проект ПОЛИМОДЕ, возглавлял морские исследования Института океанологии в рамках международного проекта "Камчия" на Черном море. Результаты этих исследований легли в основу его докторской диссертации "Пространственно-временная изменчивость термической структуры деятельного слоя океана" (1988) и широко опубликованы.

Б.Н. Филюшкин автор более 190 научных работ. Он многократно приглашался в качестве докладчика на национальные и международные конференции и съезды, в течение ряда лет был членом оргкомитета ПОЛИМОДЕ, заместителем председателя Национального комитета WOCE. Борис Никонорович член Ученого совета Института океанологии и Гидрометеорологического Совета Географического факультета МГУ. Много лет он Ответственный секретарь Редколлегии журнала «Океанология».

Б.Н. Филюшкин — один из крупнейших отечественных океанологов. Более чем за полвека научной деятельности он внес существенный вклад в исследования волн, течений и водных масс Мирового океана и по сей день сохраняет юношеский интерес и искреннюю любовь к предмету своих научных исследований.

Борис Никонорович встречает свой замечательный юбилей в расцвете творческих сил, он как всегда полон интересных и увлекательных идей и оптимизма. Поздравляя Бориса Никоноровича с днем рождения, редколлегия журнала «Океанология», коллеги и друзья желают ему новых интересных научных планов, осуществления задуманного, крепкого здоровья и счастья.