

Временная изменчивость скорости вымывания аэрозолей в Севастопольском регионе: натурные наблюдения

Д. А. Кременчуцкий

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ d.kremenchutskii@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 21.03.2022; одобрена после рецензирования 14.04.2022;
принята к публикации 04.05.2022.

Аннотация

Цель. Выявление особенностей сезонной и межгодовой изменчивости скорости вымывания аэрозолей и выделение факторов, определяющих эту изменчивость на исследуемых масштабах времени, – цель настоящего исследования.

Методы и результаты. Оценки скорости вымывания в период 2012–2020 гг. были проведены по натурным данным о временной изменчивости концентрации ^{7}Be на атмосферных аэрозолях и потоке ^{7}Be с «влажными» атмосферными выпадениями. С использованием корреляционного анализа получены оценки влияния количества и частоты выпадения осадков на сезонную и межгодовую изменчивость скорости вымывания. Множественный регрессионный анализ был использован для построения моделей регрессии.

Выводы. Скорость вымывания изменяется в пределах $0,21\text{--}1,40\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ и составляет в среднем $0,62 \pm 0,29\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Установлено, что ее сезонная изменчивость определяется количеством и частотой выпадения осадков. Межгодовая изменчивость скорости вымывания определяется только количеством выпавших осадков. По результатам исследований предложено две регрессионные модели. Одна модель позволяет описать сезонную изменчивость скорости вымывания, другая – межгодовую изменчивость этого параметра. В обеих моделях используются соответствующие временные ряды данных об изменчивости количества выпавших осадков в качестве предикторов. Результаты валидации показывают, что погрешности получаемых оценок составляют 21,1 и 12,9% для сезонных и годовых величин скорости вымывания соответственно.

Ключевые слова: бериллий-7 (^{7}Be), атмосферные осадки, скорость вымывания, атмосферный аэрозоль, поток

Благодарности: автор благодарит кандидата физ.-мат. наук Г. Ф. Батракова за его комментарии. Значимую техническую помощь в получении данных для этого исследования оказали А. П. Арбузова и Т. М. Иванова. Данные для исследования были получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 0555-2021-0004). Анализ данных проведен в рамках гранта, выданного Российским научным фондом (№ 20-77-00024).

Для цитирования: Кременчуцкий Д. А. Временная изменчивость скорости вымывания аэрозолей в Севастопольском регионе: натурные наблюдения // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 4. С. 345–357. doi:10.22449/0233-7584-2022-4-345-357

Temporal Variability of Aerosol Wet Deposition Velocity in the Sevastopol Region: Observational Data

D. A. Kremenchutskii

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

✉ d.kremenchutskii@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The study is purposed at identifying both the features of seasonal and interannual variability of the aerosol wet deposition velocity and the factors that determine this variability on the time scales under study.

Methods and Results. The deposition velocity in 2012–2020 was estimated using the field data on temporal variability of the ^{7}Be concentration on atmospheric aerosols and the ^{7}Be “wet” deposition fluxes. The correlation analysis permitted to assess quantitatively the influence of the precipitation amount and frequency upon the seasonal and interannual variability of the deposition velocity. The multiple regression analysis was applied for constructing the regression models.

Conclusions. The deposition velocity varies from 0.21 to 1.40 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ and averages $0.62 \pm 0.29 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. It has been established that its seasonal variability is conditioned by the amount and frequency of precipitation, whereas its interannual variability – by the precipitation amount only. Based on the obtained results, two regression models were proposed. The first model describes seasonal variability of the deposition velocity, while the second one – the interannual variability of this parameter. The corresponding time series of precipitation variability data are used in both models as predictors. The validation results indicate that the errors in the obtained estimates constitute 21.1 and 12.9% for the seasonal and annual values of wet deposition velocity, respectively.

Keywords: Beryllium-7 (^{7}Be), precipitation, wet deposition velocity, atmospheric aerosol, wet deposition flux

Acknowledgements: the author thanks PhD (phys.-math.) Gennady F. Batrakov for the comments. The key technical laboratory assistance was provided by Alla P. Arbutova and Tamara M. Ivanova. The data for the study were obtained within the framework of state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (No. 0555-2021-0005). The data were analyzed within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 20-77-00024.

For citation: Kremenchutskii, D.A., 2022. Temporal Variability of Aerosol Wet Deposition Velocity in the Sevastopol Region: Observational Data. *Physical Oceanography*, 29(4), pp. 321-333. doi:10.22449/1573-160X-2022-4-321-333

Введение

Атмосферный аэрозоль представляет собой твердые и жидкие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в атмосфере. Он может быть природного (напр., пыльца, эрозия почвы, извержение вулканов) и техногенного (напр., сажа, выбросы с промышленных предприятий) происхождения. Атмосферный аэрозоль содержит органические и неорганические вещества [1]. Из атмосферы аэрозоль выводится в результате гравитационного оседания и вымывания осадками. Поток аэрозоля из атмосферы на морскую поверхность является важным источником поступления многих веществ (включая биогенные вещества, радионуклиды, геотрассеры) в морскую среду [2–8]. В частности, этот поток приводит к росту продукции фитопланктона и способствует фиксации азота [9–13], а также оказывает влияние на биогеохимические процессы в водах Мирового океана [14, 15].

Вымывание атмосферного аэрозоля осадками является доминирующим механизмом его удаления из атмосферы [16]. Скорость вымывания – параметр,

который связывает концентрацию аэрозоля в атмосфере (или вещества, содержащегося на аэрозоле) с его потоком на подстилающую поверхность. Таким образом, оценив скорость вымывания и зная концентрацию интересующего вещества в атмосфере, можно рассчитать его поток из атмосферы в морскую среду. Прямые измерения скорости вымывания аэрозоля не представляются возможными. Традиционно радионуклиды являются удобными трассерами в исследованиях различных процессов, протекающих в атмосфере, включая вымывание атмосферного аэрозоля [16]. Одним из таких радионуклидов является бериллий-7 (${}^7\text{Be}$) [6, 17].

Бериллий-7 – естественный радионуклид космогенного происхождения, который непрерывно образуется преимущественно в верхних слоях атмосферы, его период полураспада равен ~ 53 сут. После образования данный радионуклид адсорбируется на атмосферном аэрозоле субмикронного размера и переносится с ним в нижние слои атмосферы. Из атмосферы ${}^7\text{Be}$ удаляется преимущественно (80–90%) путем вымывания аэрозоля «влажными» атмосферными выпадениями [16].

Исследования скорости вымывания аэрозолей в Черноморском регионе ранее не проводились.

Цель настоящей работы заключается в выявлении особенностей сезонной и межгодовой изменчивости скорости вымывания аэрозолей и в выделении факторов, определяющих эту изменчивость на исследуемых масштабах времени. Для достижения этой цели здесь представлены и проанализированы многолетние ряды натурных данных о временной изменчивости концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере и его потоках с дождевыми осадками. Эти данные были использованы для получения количественных оценок скорости вымывания аэрозоля.

Материалы и методы

Отбор проб дождевой воды. За период с января 2012 г. по декабрь 2020 г. было отобрано и обработано 405 проб дождевых осадков, которые отбирались с крыши здания Морского гидрофизического института (МГИ) РАН (г. Севастополь) с помощью эмалированной кюветы (площадь $0,64 \text{ м}^2$), расположенной на высоте $\sim 1,6$ м относительно уровня крыши и соединенной с пластиковой емкостью объемом 50 л. Такая конструкция пробоотборника позволяет эффективно собирать большой объем дождевой воды и минимизировать ее потери в результате испарения. При выпадении осадков в рабочие дни пробы отбирались один раз в день примерно в 11:00 по местному времени. В случае выпадения осадков в выходные дни происходило накопление дождевой воды. Эта вода отбиралась в ближайший рабочий день. Перед отбором пробы осадков кювета промывалась 300 мл 1–2%-ного раствора азотной или серной кислоты и 300 мл дистиллированной воды. Эта процедура позволяет минимизировать потери ${}^7\text{Be}$ в результате его сорбции на стенки пробоотборника. Величина pH пробы дождевой воды, находящейся в пластиковой емкости, понижалась примерно до двух 30%-ным раствором азотной или серной кислоты. Переливание воды из емкости и ее последующая транспортировка в лабораторию проводилась спустя 8–24 ч. Подкисление пробы и задержка по времени между отбором пробы и ее транспортировкой в лабораторию позволяет минимизиро-

вать возможные потери ${}^7\text{Be}$ в результате его сорбции на стенках емкости. В лаборатории проба сначала фильтровалась от нерастворимых примесей с использованием бумажных фильтров, затем проводилось измерение ее объема, далее дождевая вода пропусклась со скоростью $5\text{--}50\text{ мл}\cdot\text{мин}^{-1}$ через две колонки, наполненных катионитом *Dowex HCR-S/S*. Каждая колонка содержала ~ 14 мл катионита. По распределению активности ${}^7\text{Be}$ между двумя колонками с катионитом определялась эффективность извлечения радионуклида из пробы дождевых осадков. Измерения активности ${}^7\text{Be}$ в катионите проводились либо в пластиковой чашке Петри диаметром 52 мм и высотой 14 мм, либо в пластиковой вialsе диаметром 28 мм и высотой 70 мм.

Отбор проб атмосферных аэрозолей. За указанный период было отобрано и обработано 2056 проб атмосферных аэрозолей. Методика отбора проб атмосферных аэрозолей детально описана в работе [18]. В настоящей работе приводится ее краткое изложение. Пробы аэрозоля отбирались с крыши здания института высокопроизводительной (объемная скорость прокачки $\sim 525\text{ м}^3\cdot\text{ч}^{-1}$) воздухофильтрационной установкой с использованием фильтр-полотна Петрянова (ФПП-15-1,5). Данное фильтр-полотно задерживает аэрозоли размером 0,2 мкм с эффективностью 99%. В рабочие дни фильтр менялся один раз в сутки примерно в 11:00 по местному времени. В выходные дни замена фильтра не выполнялась. Таким образом, в обычном режиме за неделю отбиралось четыре суточных пробы и одна трехсуточная. По окончании отбора пробы фильтр спрессовывался в таблетку диаметром 52 мм и высотой 5 мм. Измерение активности ${}^7\text{Be}$ в пробе проводилось спустя 7–10 дней после того, как проба была отобрана. Эта задержка по времени позволяет снизить активность короткоживущих гамма-активных радионуклидов (продукты распада радона и торона) в пробе на порядки. Снижение активности этих радионуклидов существенно упрощает вид гамма-спектра и процедуру его анализа.

Измерения активности ${}^7\text{Be}$ в отобранных пробах проводились с использованием двух низкофоновых гамма-спектрометров со сцинтилляционными детекторами NaI(Tl). Первый гамма-спектрометр имел кристалл диаметром 63 мм и высотой 63 мм, разрешение 7% по пику ${}^{137}\text{Cs}$. Этот детектор находился в защите, состоящей из 15 см свинца, 5 мм кадмия, 3 мм меди и 1 см оргстекла. Второй гамма-спектрометр имел кристалл диаметром 100 мм и высотой 100 мм, с колодцем диаметром 30 мм и высотой 60 мм, разрешение 7% по пику ${}^{137}\text{Cs}$. Второй детектор находился в защите из 14 см свинца и 15 см чугуна. Время измерения единичной пробы изменялось в диапазоне 5–24 ч и зависело от активности ${}^7\text{Be}$ в пробе. Погрешность измерений активности ${}^7\text{Be}$ в пробах дождевой воды и атмосферных аэрозолей обычно не превышала 15 и 10% соответственно.

Данные об осадках. Оценки количества выпавших осадков были получены путем нормирования объема отобранной пробы осадков на площадь пробоотборника. Под частотой выпадения осадков подразумевается количество дней с осадками за рассматриваемый период времени.

Скорость вымывания аэрозоля из атмосферы рассчитывалась по следующей формуле:

$$V_d = \frac{F}{C_a}, \quad (1)$$

где V_d – скорость вымывания, $\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$; F – усредненная за сезон или за год величина потока ${}^7\text{Be}$ из атмосферы, $\text{Бк} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; C_a – усредненная за сезон или за год величина концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере, $\text{Бк} \cdot \text{см}^{-3}$.

Результаты и обсуждение

Статистические характеристики рядов данных о потоке и концентрации ${}^7\text{Be}$. Полученные величины потока ${}^7\text{Be}$ и его концентрации в атмосфере были использованы для расчета сезонных и годовых характеристик указанных параметров. Для этого данные о потоке суммировались для каждого отдельного сезона и года, а данные о концентрации усреднялись. Временные ряды сезонных величин потока и концентрации ${}^7\text{Be}$ показан на рис. 1.

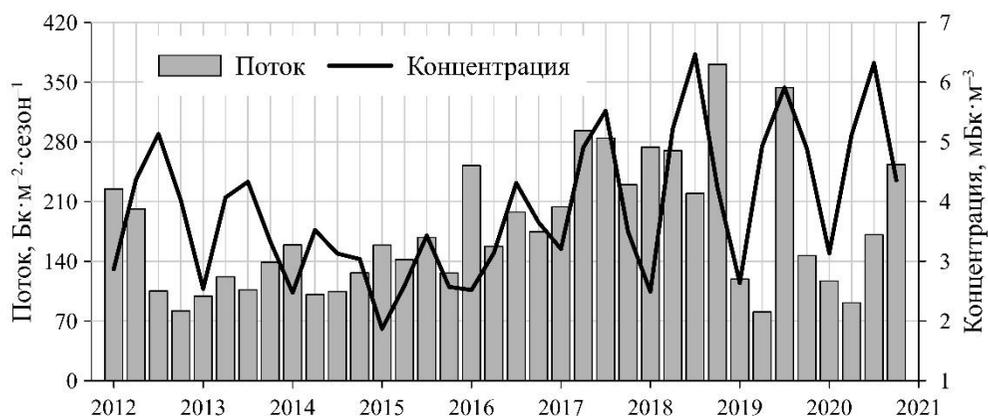
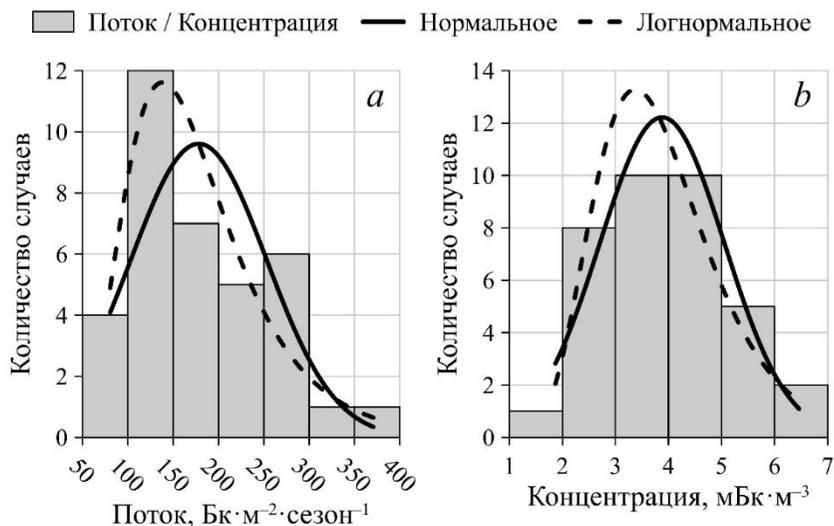


Рис. 1. Сезонная изменчивость потока и концентрации ${}^7\text{Be}$

Fig. 1. Seasonal variability of the ${}^7\text{Be}$ flux and concentration

Величины потока ${}^7\text{Be}$ с дождевыми осадками и его концентрации в атмосфере изменялись в диапазонах $81\text{--}371 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сезон}^{-1}$ и $1,9\text{--}6,5 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ соответственно. Средние величины составили $178 \pm 76 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сезон}^{-1}$ и $3,9 \pm \pm 1,2 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ для потока и концентрации. Частотное распределение данных обсуждаемых рядов приведено на рис. 2. Распределение исследуемых рядов ближе к логнормальному, чем к нормальному, что, согласно опубликованным сведениям из работ [19–21], является характерным для такого рода данных. Результаты тестов на нормальность Шапиро – Уилка и Андерсона – Дарлингга показывают, что частотные распределения обоих параметров отличаются от нормального статистически не значимо на уровне достоверности 99%. Коэффициенты вариации составили 43 и 31% для данных о потоке и концентрации соответственно, что указывает на наличие значительной временной изменчивости в исследуемых рядах.



Р и с. 2. Частотное распределение данных о потоке ${}^7\text{Be}$ (a) и его концентрации (b)
Fig. 2. Frequency distribution of the ${}^7\text{Be}$ flux (a) and concentration (b) data

Усредненная за весь период наблюдений суммарная за год величина потока ${}^7\text{Be}$ с «влажными» атмосферными выпадениями равна $712 \pm 227 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. Полученная средняя величина потока согласуется с опубликованными данными: $527 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ в Дамаске, Сирия [22]; $738 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ в Рисо, Дания [23]; $736 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ в Салониках, Греция [24]; $785 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ в Александрии, Египет [25]. Для сравнения использовались данные с тех станций, на которых наблюдались близкие годовые суммы осадков.

Усредненная за весь период наблюдений среднегодовая величина концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере равна $3,9 \pm 0,8 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$. Это значение хорошо согласуется с опубликованными данными для станций, расположенных в средних широтах Северного полушария: $4,7 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ в Валенсии, Испания ($39,4^\circ$ с. ш.) [26]; $4,2 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ в Малаге, Испания ($36,7^\circ$ с. ш.) [27]; $3,8 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ в Барселоне, Испания ($41,3^\circ$ с. ш.) [28]; $3,2 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ в Бильбао, Испания ($43,1^\circ$ с. ш.) [20]; $3,7 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ в Любляне, Словения ($46,0^\circ$ с. ш.) [28].

Внутригодовая изменчивость скорости вымывания. Усредненная за сезон скорость вымывания ${}^7\text{Be}$ из атмосферы изменялась во времени в пределах $0,21\text{--}1,40 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ и составляла в среднем $0,62 \pm 0,29 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Полученные оценки не противоречат опубликованным данным: $0,78 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ в Брисбене, Австралия [29]; $0,5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ в Уэльве, Испания [30]; $0,5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ в Салониках, Греция [17].

Внутригодовая изменчивость скорости вымывания ${}^7\text{Be}$, усредненная за весь период наблюдений, показана на рис. 3, a. Наблюдается выраженная сезонная изменчивость с пониженными величинами в весенний и летний сезоны ($0,50$ и $0,49 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ соответственно) и максимальным значением в зимний сезон ($0,88 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$).

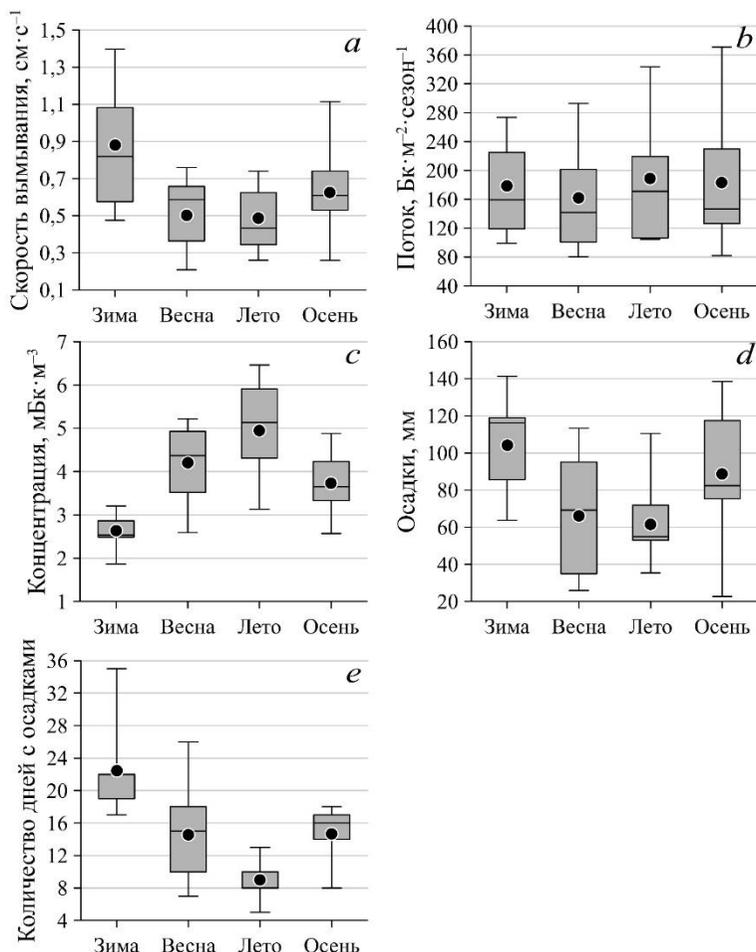


Рис. 3. Усредненные за весь период наблюдений данные о сезонной изменчивости скорости вымывания ^7Be , $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (a), потока ^7Be , $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{сезон}^{-1}$ (b), концентрации ^7Be в атмосфере, $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ (c), количества осадков, $\text{mm}\cdot\text{сезон}^{-1}$ (d) и частоты осадков, сут (e)

Fig. 3. Averaged over the whole observation period data on seasonal variability of the ^7Be wet deposition velocity, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (a), the ^7Be wet deposition flux, $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{season}^{-1}$ (b), the ^7Be concentration in the atmosphere, $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ (c), precipitation amount, $\text{mm}\cdot\text{season}^{-1}$ (d) and frequency, days (e)

Множественный регрессионный анализ был проведен с целью получения количественных оценок влияния потока и концентрации ^7Be на сезонную изменчивость скорости вымывания. Результаты анализа показывают, что сезонная изменчивость скорости вымывания на 69% определяется вариацией потока и на 31% – вариацией концентрации. Стоит отметить, что сезонная изменчивость отсутствует во временном ряду потока ^7Be (рис. 3, b), но присутствует в ряду его концентрации (рис. 3, c) с максимумом в летний сезон ($4,9 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$) и минимумом в зимний ($2,6 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$).

Согласно результатам корреляционного анализа (табл. 1), поток ^7Be статистически значимо на уровне достоверности 95% связан только с суммой атмосферных осадков ($r = 0,64$). Связь с частотой осадков и концентрацией ^7Be в атмосфере отсутствует. Таким образом, на сезонном масштабе времени чем

больше выпадает осадков, тем выше поток ${}^7\text{Be}$. Результаты корреляционного анализа показывают, что на сезонную изменчивость концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере оказывает влияние как количество, так и частота выпадающих осадков. Рост количества и частоты осадков уменьшает усредненную за сезон величину концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере. Основываясь на абсолютных величинах коэффициентов корреляции, можно сделать вывод, что на сезонном масштабе времени распределение осадков в течение рассматриваемого сезона имеет большее значение, чем объем выпавших осадков (коэффициенты корреляции $-0,51$ и $-0,38$ соответственно). Стоит отметить также, что количество и частота осадков связаны между собой: сезоны с повышенной суммой осадков характеризуются повышенной частотой ($r = 0,61$).

Т а б л и ц а 1
Table 1

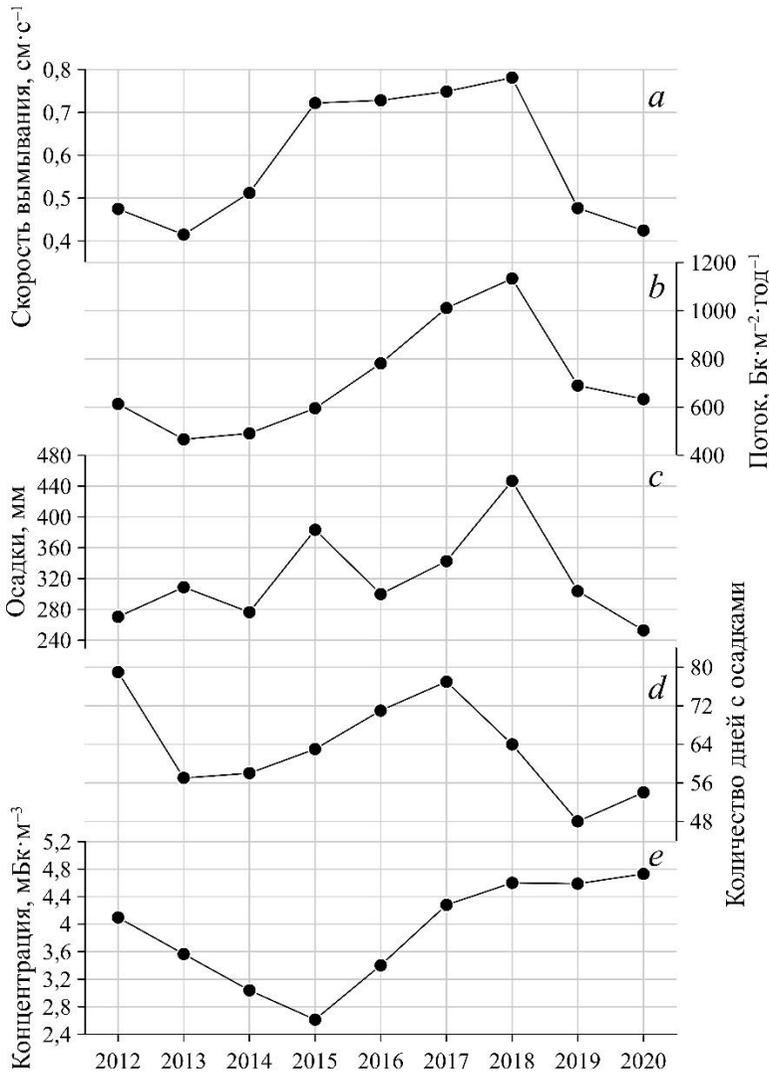
Парные коэффициенты корреляции Пирсона между сезонными значениями исследуемых параметров
Pearson paired correlation coefficients between the seasonal values of the studied parameters

Параметр / Parameter	F	Pr_a	Pr_f	C_a	V_d
F	1,0	0,64 $p < 0,01$	0,29 $p = 0,09$	0,26 $p = 0,12$	0,69 $p < 0,01$
Pr_a	–	1,0	0,61 $p < 0,01$	$-0,38$ $p = 0,02$	0,84 $p < 0,01$
Pr_f	–	–	1,0	$-0,51$ $p < 0,01$	0,60 $p < 0,01$
C_a	–	–	–	1,0	$-0,46$ $p < 0,01$
V_d	–	–	–	–	1,0

Результаты корреляционного анализа показывают, что наиболее сильная связь наблюдается между скоростью вымывания и количеством осадков ($r = 0,84$): рост количества осадков увеличивает скорость вымывания. Аналогичное по знаку, но меньшее по силе влияние на сезонную изменчивость скорости вымывания оказывает рост частоты осадков ($r = 0,60$).

Межгодовая изменчивость скорости вымывания. Многолетняя изменчивость рассматриваемых в работе параметров показана на рис. 4. Среднегодовая величина скорости вымывания изменялась в интервале $0,41\text{--}0,78 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ и составляла в среднем $0,59 \pm 0,15 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Повышенные величины ($0,72\text{--}0,78 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$) отмечались в 2015–2018 гг., пониженные ($0,41\text{--}0,51 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$) – в 2012–2014 гг. и в 2019–2020 гг. ($0,42\text{--}0,48 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$). В период 2012–2013 гг. отмечалось снижение потока ${}^7\text{Be}$ с 613 до 466 $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$, далее в 2014–2018 гг. наблюдался рост суммарной за год величины потока до 1133 $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$, после

чего в 2019–2020 гг. последовало снижение до $633 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. В период 2012–2015 гг. концентрация ${}^7\text{Be}$ в атмосфере снижалась с 4,1 до $2,3 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$, с 2016 по 2020 гг. отмечался ее рост с 3,4 до $4,7 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$.



Р и с. 4. Межгодовая изменчивость скорости вымывания ${}^7\text{Be}$ (a), потока ${}^7\text{Be}$ с осадками (b), количества (c) и частоты (d) осадков, концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере (e)

Fig. 4. Interannual variability of the ${}^7\text{Be}$ deposition velocity (a), the ${}^7\text{Be}$ wet deposition flux (b), the precipitation amount (c) and frequency (d), and the ${}^7\text{Be}$ concentration in the atmosphere (e)

Согласно результатам корреляционного анализа (табл. 2), межгодовая изменчивость среднегодовых значений скорости вымывания ${}^7\text{Be}$ определяется временной изменчивостью его потока ($r = 0,75$). Временная изменчивость потока ${}^7\text{Be}$ зависит от изменчивости количества осадков ($r = 0,67$). Таким образом, межгодовая изменчивость среднегодовых значений контролируется коли-

чеством осадков ($r = 0,76$): рост годовой суммы атмосферных осадков приводит как к росту суммарной за год величины потока ${}^7\text{Be}$, так и к росту усредненной за год величины скорости вымывания ${}^7\text{Be}$. Отметим, что по результатам корреляционного анализа (табл. 2), отсутствует статистически значимая на уровне достоверности 95% корреляционная связь между межгодовой изменчивостью скорости вымывания и концентрацией ${}^7\text{Be}$ в атмосфере. Также стоит отметить, что межгодовая изменчивость количества и частоты выпадения осадков не оказывает статистически значимого на уровне достоверности 95% влияния на межгодовую изменчивость концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

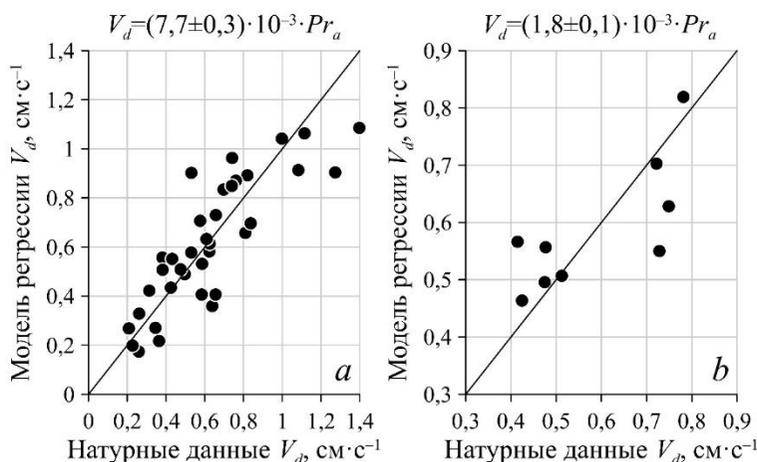
Парные коэффициенты корреляции Пирсона между годовыми значениями исследуемых параметров *
Pearson paired correlation coefficients between the annual values of the studied parameters

Параметр / Parameter	F	Pr_a	Pr_f	C_a	V_d
F	1,0	0,67 $p = 0,05$	0,38 $p = 0,32$	0,51 $p = 0,16$	0,75 $p = 0,02$
Pr_a	–	1,0	0,12 $p = 0,76$	–0,03 $p = 0,95$	0,76 $p = 0,02$
Pr_f	–	–	1,0	–0,10 $p = 0,80$	0,49 $p = 0,18$
C_a	–	–	–	1,0	–0,17 $p = 0,66$
V_d	–	–	–	–	1,0

* Обозначения см. в табл. 1.

* See designations in Table 1.

Модель регрессии. По результатам множественного регрессионного анализа предложены модели регрессии, позволяющие рассчитывать сезонную и межгодовую изменчивость скорости вымывания ${}^7\text{Be}$. Учитывая взаимосвязь между рассматриваемыми в работе параметрами (табл. 1 и 2), в качестве предиктора модели сезонной и межгодовой изменчивости скорости осаждения используются только соответствующие временные ряды количества выпавших осадков. На рис. 5 показаны результаты сопоставления рассчитанных по моделям регрессии значений скорости вымывания с полученными по натурным данным. Средние относительные погрешности получаемых оценок составили 21,1 и 12,9% для сезонных и годовых величин скорости вымывания соответственно.



Р и с. 5. Сопоставление сезонных (а) и годовых (b) величин скорости вымывания ${}^7\text{Be}$, рассчитанных по соответствующим моделям регрессии, с полученными по натурным данным. Уравнения моделей приведены на фрагментах. Точками показаны результаты расчетов, сплошными линиями – случаи полного соответствия рассчитанных значений натурным данным

F i g. 5. Comparison of the seasonal (a) and annual (b) values of the ${}^7\text{Be}$ deposition velocity calculated using the corresponding regression model, with those resulted from the field data. Model equations are given at the fragments. The dots show the calculation results, the solid lines – the cases of full compliance of the calculated values with field data

Выводы

По результатам исследования сезонной и межгодовой изменчивости скорости вымывания аэрозолей в период 2012–2020 гг. были сделаны следующие выводы.

1. В Севастопольском регионе имеет место сезонная и межгодовая изменчивость скорости вымывания аэрозолей. Сезонные величины изменялись в диапазоне $0,21\text{--}1,40\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Пониженные значения характерны для весеннего и летнего сезонов, повышенные – для зимнего сезона. Годовые величины изменялись в более узком интервале $0,41\text{--}0,78\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Повышенные значения отмечались в период 2015–2018 гг., пониженные – в остальные годы. Среднегодовая величина скорости вымывания, усредненная за весь период наблюдений, составила $0,59 \pm 0,15\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$.

2. Результаты корреляционного анализа показывают, что сезонные вариации скорости вымывания определяются количеством и частотой выпадения осадков, межгодовая изменчивость этого параметра зависит только от количества выпавших осадков.

3. По результатам анализа предложено две регрессионные модели. Одна модель позволяет описать сезонную изменчивость скорости вымывания, другая – межгодовую изменчивость этого параметра. В обеих моделях используются соответствующие временные ряды данных об изменчивости количества выпавших осадков в качестве предикторов. Согласно результатам валидации, погрешности получаемых оценок составляют 21,1 и 12,9% для сезонных и годовых величин скорости вымывания соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вареник А. В., Калинин Д. В., Мыслина М. А.* Исследование взвешенных микрочастиц в атмосфере береговой зоны Черного моря по натурным и спутниковым данным // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 3. С. 350–361. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-350-361>
2. *Prospero J. M.* Saharan Dust Transport Over the North Atlantic Ocean and Mediterranean: An Overview // *The Impact of Desert Dust Across the Mediterranean* / Eds. S. Guerzoni, R. Chester. Dordrecht : Springer, 1996. P. 133–151. (Environmental Science and Technology Library book series, vol. 11). https://doi.org/10.1007/978-94-017-3354-0_13
3. *Prospero J. M.* The Chemical and Physical Properties of Marine Aerosols: An Introduction // *Chemistry of Marine Water and Sediments* / Eds. A. Gianguzza, E. Pelizzetti, S. Sammartano. Berlin, Heidelberg : Springer, 2002. P. 35–82. (https://doi.org/10.1007/978-3-662-04935-8_2)
4. Numerical simulation of the intra-annual evolution of beryllium-7 (^7Be) in the surface layer of the Black Sea / D. A. Kremenchutskii [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. P. 11120–11127. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1269-y>
5. Role of suspended matter in controlling beryllium-7 (^7Be) in the Black Sea surface layer / D. A. Kremenchutskii [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2021. Vol. 217. 103513. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103513>
6. *Kadko D., Landing W. M., Buck C. S.* Quantifying Atmospheric Trace Element Deposition Over the Ocean on a Global Scale With Satellite Rainfall Products // *Geophysical Research Letters*. 2020. Vol. 47, iss. 7. e2019GL086357. <https://doi.org/10.1029/2019GL086357>
7. *Вареник А. В.* Влияние выбросов от стационарных источников на загрязнение атмосферных осадков неорганическим азотом на примере г. Севастополя // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 3. С. 277–286. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-3-277-286>
8. *Varenik A. V., Konovalov S. K.* Variations in Concentrations and Ratio of Soluble Forms of Nutrients in Atmospheric Depositions and Effects for Marine Coastal Areas of Crimea, Black Sea // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, iss. 23. 11509. <https://doi.org/10.3390/app112311509>
9. Large-scale distribution of Atlantic nitrogen fixation controlled by iron availability / C. M. Moore [et al.] // *Nature Geoscience*. 2009. Vol. 2. P. 867–871. <https://doi.org/10.1038/ngeo667>
10. Impacts of atmospheric nutrient deposition on marine productivity: Roles of nitrogen, phosphorus, and iron / G. S. Okin [et al.] // *Global Biogeochemical Cycles*. 2011. Vol. 25, iss. 2. GB2022. <https://doi.org/10.1029/2010GB003858>
11. *Baker A. R., Jickells T. D.* Atmospheric deposition of soluble trace elements along the Atlantic Meridional Transect (AMT) // *Progress in Oceanography*. 2017. Vol. 158. P. 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.10.002>
12. *Вареник А. В., Козловская О. Н., Симонова Ю. В.* Оценка поступления биогенных элементов с атмосферными выпадениями в районе Южного берега Крыма (Кацивели) в 2010 – 2015 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. Т. 32, № 5. С. 65–75. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-5-65-75>
13. *Varenik A. V., Kalinskaya D. V.* The Effect of Dust Transport on the Concentration of Chlorophyll-A in the Surface Layer of the Black Sea // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, iss. 10. P. 4692. <https://doi.org/10.3390/app11104692>
14. *Morel F. M. M., Milligan A. J., Saito M. A.* Marine Bioinorganic Chemistry: The Role of Trace Metals in the Oceanic Cycles of Major Nutrients // *The Oceans and Marine Geochemistry* / Ed. H. Elderfield. Oxford : Elsevier, 2003. P. 113–143. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/06108-9>
15. *Morel F. M. M., Price N. M.* The Biogeochemical Cycles of Trace Metals in the Oceans // *Science*. 2003. Vol. 300, iss. 5621. P. 944–947. <https://doi.org/10.1126/science.1083545>
16. A global dataset of atmospheric ^7Be and ^{210}Pb measurements: annual air concentration and depositional flux / F. Zhang [et al.] // *Earth System Science Data*. 2021. Vol. 13, iss. 6. P. 2963–2994. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2963-2021>

17. *Ioannidou A.* ⁷Be aerosols and their deposition on the sea: a possible method to estimate trace metals deposition on the sea // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012. Vol. 108. P. 29–32. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.11.012>
18. *Kremenchutskii D. A.* Influence of precipitation on the daily beryllium-7 (⁷Be) activity concentration in the atmospheric surface layer // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 237. 106722. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106722>
19. ⁷Be spatial and temporal pattern in southwest of Europe (Spain): Evaluation of a predictive model / E. Chham [et al.] // *Chemosphere*. 2018. Vol. 205. P. 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.099>
20. Meteorological Factors Controlling ⁷Be Activity Concentrations in the Atmospheric Surface Layer in Northern Spain / N. Alegria [et al.] // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, iss. 12. 1340. <https://doi.org/10.3390/atmos11121340>
21. *Baskaran M., Coleman C. H., Santschi P. H.* Atmospheric depositional fluxes of ⁷Be and ²¹⁰Pb at Galveston and College Station, Texas // *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 1993. Vol. 98, iss. D11. P. 20555–20571. <https://doi.org/10.1029/93JD02182>
22. *Othman I., Al-Masri M. S., Hassan M.* Fallout of ⁷Be in Damascus City // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1998. Vol. 238, iss. 1–2. P. 187–192. <https://doi.org/10.1007/BF02385379>
23. *Fogh C. L., Roed J., Andersson K. G.* Radionuclide resuspension and mixed deposition at different heights // *Journal of Environmental Radioactivity*. 1999. Vol. 46, iss. 1. P. 67–75. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(98\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(98)00130-1)
24. *Ioannidou A., Papastefanou C.* Precipitation scavenging of ⁷Be and ¹³⁷Cs radionuclides in air // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 85, iss. 1. P. 121–136. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.06.005>
25. *Saleh I. H., Abdel-Halim A. A.* ⁷Be in soil, deposited dust and atmospheric air and its using to infer soil erosion along Alexandria region, Egypt // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 172. P. 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.03.005>
26. Analysis of the influence of solar activity and atmospheric factors on ⁷Be air concentration by seasonal-trend decomposition / M. C. Bas [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 145. P. 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.027>
27. *Pinero-García F., Ferro-García M. A.* Evolution and solar modulation of ⁷Be during the solar cycle 23 // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013. Vol. 296. P. 1193–1204. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-2373-y>
28. A climatology of ⁷Be in surface air in European Union / M. A. Hernández-Ceballos [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol. 141. P. 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.12.003>
29. *Doering C., Akber R.* Beryllium-7 in near-surface air and deposition at Brisbane, Australia // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2008. Vol. 99, iss. 3. P. 461–467. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.08.017>
30. Depositional fluxes and concentrations of ⁷Be and ²¹⁰Pb in bulk precipitation and aerosols at the interface of Atlantic and Mediterranean coasts in Spain / R. L. Lozano [et al.] // *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 2011. Vol. 116, iss. D18. D18213. <https://doi.org/10.1029/2011JD015675>

Об авторе:

Кременчукский Дмитрий Александрович, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8747-6612**, **ResearchID: AAC-1673-2020**, d.kremenchutskii@mhi-ras.ru

Вертикальный перенос импульса внутренними волнами в западной части Средиземного моря

А. А. Слепышев , А. В. Носова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 slep55@mail.ru

Поступила в редакцию 10.03.2022; одобрена после рецензирования 13.04.2022;
принята к публикации 04.05.2022.

Аннотация

Цель. Исследование вертикального переноса импульса внутренними волнами при учете вращения Земли и сдвигового течения в западной части Средиземного моря, изучение влияния турбулентной вязкости и диффузии на указанные волновые потоки и стоков дрейф – цель данной работы.

Методы и результаты. Для решения исходной системы нелинейных уравнений гидродинамики используется слабонелинейный подход. В первом порядке малости по амплитуде волны решается краевая задача для амплитуды вертикальной скорости, во втором порядке по амплитуде волны исследуются нелинейные эффекты: стоков дрейф и вертикальные волновые потоки импульса. Указанная краевая задача решается двумя способами: методом возмущений, применявшимся ранее, и численным методом по неявной схеме Адамса третьего порядка точности. Метод возмущений предполагает разложение решения и частоты волны в ряд по малому параметру, пропорциональному горизонтальной турбулентной вязкости. В работе сравниваются результаты, полученные методом возмущений и численным методом. Показано совпадение результатов по расчету дисперсионных кривых обоими методами. Однако для декремента затухания волны метод возмущений дает завышенные значения, для второй моды большие, чем для первой. Вертикальные волновые потоки импульса отличны от нуля, и метод возмущений дает завышенные значения для потока \overline{uw} . Вертикальный волновой поток импульса \overline{vw} практически не зависит от турбулентной вязкости и диффузии, и оба метода дают для него идентичные результаты. Компонента скорости стокова дрейфа вдоль направления распространения волны также нечувствительна к турбулентной вязкости и диффузии, в то время как поперечная составляющая равна нулю при отсутствии турбулентной вязкости и диффузии.

Выводы. Метод возмущений дает завышенные значения декрементов затухания волны, волнового потока импульса \overline{uw} и поперечной составляющей скорости стокова дрейфа. На волновой поток импульса \overline{vw} и продольную составляющую скорости стокова дрейфа горизонтальная турбулентная вязкость и диффузия влияния практически не оказывают.

Ключевые слова: внутренние волны, волновой поток импульса, стоков дрейф

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0004.

Для цитирования: Слепышев А. А., Носова А. В. Вертикальный перенос импульса внутренними волнами в западной части Средиземного моря // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 4. С. 358–371. doi:10.22449/0233-7584-2022-4-358-371

Vertical Transfer of Momentum by Internal Waves in the Western Part of the Mediterranean Sea

A. A. Slepyshev , A. V. Nosova

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 slep55@mail.ru

Abstract

Purpose. The work is aimed at studying both the momentum vertical transfer by internal waves with the regard for the Earth rotation and the shear current in the western part of the Mediterranean Sea, and the influence of turbulent viscosity and diffusion upon the indicated wave fluxes and the Stokes drift.

Methods and Results. To solve the initial system of the hydrodynamics nonlinear equations, a weakly nonlinear approach was used. In the first order of smallness in the wave amplitude, the boundary problem for the vertical velocity amplitude was solved; in the second order in the wave amplitude, the nonlinear effects, namely the Stokes drift and the vertical wave momentum fluxes, were investigated. The indicated boundary problem was solved in two ways: by the perturbation method applied earlier and by the numerical one by the implicit Adams scheme of the third order of accuracy. The perturbation method assumes expansion of the solution and the wave frequency in a series by a small parameter proportional to the horizontal turbulent viscosity. The results obtained by the perturbation and numerical methods were compared. Coincidence of the results of calculating the dispersion curves by both methods is shown. However, for the wave damping decrement, the perturbation method yields the overestimated values, at that for the second mode the values are higher than those for the first one. The vertical wave momentum fluxes are nonzero, and the perturbation method yields the overestimated values for the flux \overline{uw} . The vertical wave momentum flux \overline{vw} is practically independent of turbulent viscosity and diffusion, and both methods give the identical results for it. The velocity component of the Stokes drift along the wave propagation direction is also insensitive to turbulent viscosity and diffusion, whereas the transverse component equals zero in the absence of turbulent viscosity and diffusion.

Conclusions. The perturbation method provides the overestimated values of the wave damping decrements, the wave momentum flux \overline{uw} and the transverse component of the Stokes drift velocity. The horizontal turbulent viscosity and diffusion exert practically no effect upon the wave momentum flux \overline{vw} and the longitudinal component of the Stokes drift velocity.

Keywords: internal waves, wave momentum flux, Stokes drift

Acknowledgements: the study was carried out within the framework of the state assignment on theme No. 0555-2021-0004.

For citation: Slepyshev, A.A. and Nosova, A.V., 2022. Vertical Transfer of Momentum by Internal Waves in the Western Part of the Mediterranean Sea. *Physical Oceanography*, 29(4), pp. 334-346. doi:10.22449/1573-160X-2022-4-334-346

Введение. Внутренние волны играют большую роль в динамических процессах океана. Особенно это касается шельфа и континентального склона. Источники генерации внутренних волн самые разнообразные: атмосферные возмущения, взаимодействие течений и приливов с неоднородностями рельефа дна [1], генерация внутренних волн синоптическими вихрями. Внутренние волны могут порождаться при гидродинамической неустойчивости течений [2]. В настоящей работе вертикальный обмен связывается с внутренними волнами, и это не случайно. Внутренние волны нередко порождают турбулентность, которая вызывает перемешивание стратифицированных слоев жидко-

сти. Таким образом, мелкомасштабная турбулентность обуславливает вертикальный обмен в океане [3]. Турбулентность порождается при обрушении поверхностных и внутренних волн [3, 4]. Гидродинамическая неустойчивость течений и внутренних волн также приводит к генерации турбулентности [2, 5, 6]. Нередко гидродинамическая неустойчивость течений порождает внутренние волны, которые тоже становятся неустойчивыми и генерируют более мелкомасштабные волны [7]. Следовательно, происходит каскадный перенос энергии в малые масштабы, вплоть до турбулентности. Обрушение внутренних волн отнюдь не типичный процесс в океане, гораздо чаще турбулентность поддерживается слабым сдвигом скорости течения во внутренней волне¹.

В стратифицированной морской среде турбулентность сильно подавлена, но благодаря стратификации и существуют внутренние волны, поэтому исследование их вклада в вертикальный обмен представляется важной и актуальной задачей. Проблема взаимодействия внутренних волн и турбулентности еще далека от своего решения, так как ключевую роль в этом играют нелинейные взаимодействия.

Турбулентная вязкость и диффузия позволяют описать воздействие мелкомасштабной турбулентности на внутренние волны, которые при учете турбулентной вязкости и диффузии затухают [8–10]. Вертикальные волновые потоки импульса при этом отличны от нуля [11, 12]. Однако эти потоки находились при решении краевой задачи для амплитуды вертикальной скорости методом возмущений путем разложения решения и частоты волны в ряды по малому параметру, пропорциональному горизонтальной турбулентной вязкости. В настоящей работе эта краевая задача решается численно по неявной схеме Адамса третьего порядка точности. Представляет интерес сравнить волновые потоки импульса, полученные численным методом и методом возмущений. Это же касается и скорости стокового дрейфа частиц жидкости. Вертикальные волновые потоки импульса у инерционно-гравитационных внутренних волн отличны от нуля и при отсутствии турбулентной вязкости и диффузии при наличии течения, у которого компонента скорости, нормальная к направлению распространения волны, зависит от вертикальной координаты [13, 14]. В этой связи актуально исследовать влияние горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии на указанные процессы.

Постановка задачи. В приближении Буссинеска рассматриваются свободные инерционно-гравитационные внутренние волны на плоскопараллельном сдвиговом течении при учете горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии. Нелинейные уравнения гидродинамики для волновых возмущений решаются в слабонелинейном приближении: в линейном приближении исследуются дисперсионные свойства внутренних волн и находится декремент затухания волны, во втором порядке по амплитуде волны находятся вертикальные волновые потоки импульса и скорость стокового дрейфа.

¹ *Островский Л. А., Соустова И. А., Цимринг Л. Ш.* Воздействие внутренних волн на мелкомасштабную турбулентность в океане. Н. Новгород, 1981. 15 с. (Препринт № 31 / ИПФ АН СССР). 360

Уравнения движения для волновых возмущений имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + (u + U_0) \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv + w \frac{dU_0}{dz} = \\ = -\frac{\partial P}{\rho_0(0)\partial x} + K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (u + U_0) \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{\partial P}{\rho_0(0)\partial y} + K \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + (u + U_0) \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ = -\frac{\partial P}{\rho_0(0)\partial z} + K \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - g \frac{\rho}{\rho_0(0)}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (u + U_0) \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = -w \frac{d\rho_0}{dz} + M \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + M \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

где x, y, z – декартовы координаты, ось z направлена противоположно ускорению свободного падения g ; u, v, w – проекции волновой скорости течения в указанной системе координат; ρ_0 – невозмущенная средняя плотность воды;

P и ρ – волновые возмущения давления и плотности; f – параметр Кориолиса; K, M – коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии, которые полагаются постоянными; $U_0(z)$ – скорость среднего течения. Сделаем оценку горизонтального масштаба изменения средней плотности. Для этого используем геострофические соотношения². Из них следует оценка для

указанного масштаба $L_p = \frac{\rho_0}{|\partial \rho_0 / \partial y|} = \frac{g}{f |\partial U_0 / \partial z|}$. Профиль вертикального гра-

диента скорости среднего течения приведен на рис. 1, а. Максимальное значение модуля вертикального градиента скорости течения составляет $2,2 \cdot 10^{-2} \cdot 1/\text{с}$, тогда L_p – не менее $5,19 \times 10^6$ м, т. е. много больше длины волны. Таким образом, зависимость средней плотности от горизонтальной координаты можно пренебречь.

В качестве граничных условий используем условия «твердой крышки» на поверхности и отсутствие тангенциальных напряжений³ [9]:

$$w = 0, \quad K \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad K \frac{\partial w}{\partial y} = 0, \quad z = 0, \quad (6)$$

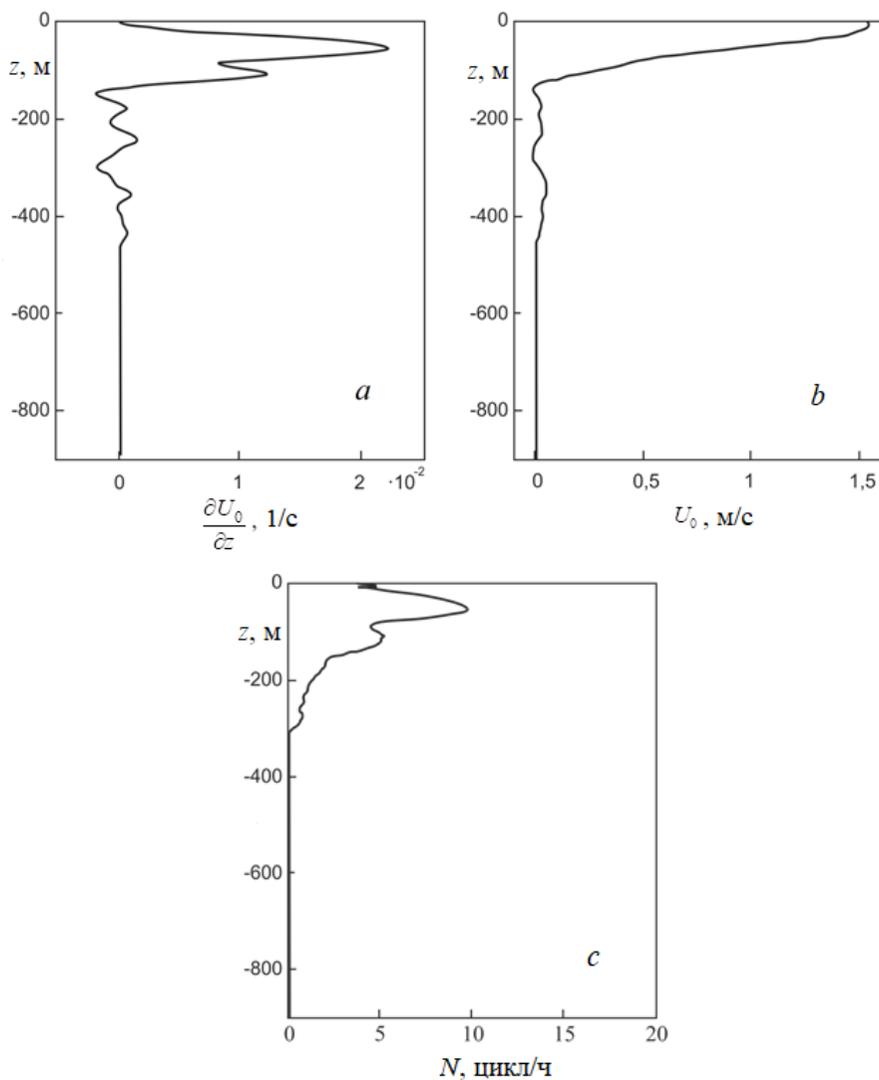
² Каменкович В. М. Основы динамики океана. Ленинград : Гидрометеоздат, 1973. С. 128.

³ Миропольский Ю. З. Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Ленинград : Гидрометеоздат, 1981. С. 30.

на дне – условие непротекания и также отсутствие тангенциальных напряжений³ [9]:

$$w=0, \quad K \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad K \frac{\partial w}{\partial y} = 0, \quad z = -H, \quad (7)$$

где H – глубина моря.



Р и с. 1. Вертикальные профили градиента скорости течения (a), скорости течения (b), частоты Брента – Вэйсяля (c)

F i g. 1. Vertical profiles of the current velocity gradient (a), the current velocity (b) and the Brunt – Väisälä frequency (c)

У дна тангенциальные напряжения нулевые, так как коэффициентами вертикального обмена пренебрегаем по сравнению с коэффициентами горизонтального турбулентного обмена.

Линейное приближение. Решения линейного приближения ищем в следующем виде [11–14]:

$$\begin{aligned} u &= u_{10}(z)A \exp(i(kx - \omega t)) + \text{с.с.}, \quad v = v_{10}(z)A \exp(i(kx - \omega t)) + \text{с.с.}, \\ w_1 &= w_{10}(z)A \exp(i(kx - \omega t)) + \text{с.с.}, \\ P_1 &= P_{10}(z)A \exp(i(kx - \omega t)) + \text{с.с.}, \quad \rho_1 = \rho_{10}(z)A \exp(i(kx - \omega t)) + \text{с.с.}, \end{aligned} \quad (8)$$

где A – амплитудный множитель; k – горизонтальное волновое число; ω – частота волны; с.с. – комплексно сопряженные слагаемые.

После подстановки (8) в систему (1) – (5) следует связь амплитудных функций u_{10} , P_{10} , ρ_{10} , v_{10} с w_{10} [11, 12]:

$$u_{10} = \frac{i}{k} \frac{dw_{10}}{dz}, \quad \Omega = \omega - k \cdot U_0, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{P_{10}}{\rho_0(0)} &= \frac{i}{k} \left[\frac{\Omega}{k} \frac{dw_{10}}{dz} + \frac{dU_0}{dz} w_{10} - \frac{if^2}{k(i\Omega - k^2 K)} \frac{dw_{10}}{dz} + ikK \frac{dw_{10}}{dz} \right], \\ \rho_{10} &= \frac{w_{10}}{i\Omega - k^2 M} \frac{d\rho_0}{dz}, \quad v_{10} = \frac{if}{k(i\Omega - k^2 K)} \frac{dw_{10}}{dz}. \end{aligned} \quad (10)$$

Функция w_{10} удовлетворяет следующему уравнению [11, 12]:

$$\begin{aligned} (\Omega + ik^2 K) \left[\Omega^2 + 2i\Omega k^2 K - f^2 - k^4 K^2 \right] \frac{d^2 w_{10}}{dz^2} - kf^2 \frac{dU_0}{dz} \frac{dw_{10}}{dz} + \\ + k \left[\left(\frac{d^2 U_0}{dz^2} - k\Omega - ik^3 K \right) (\Omega + ik^2 K)^2 + kN^2 \frac{(\Omega + ik^2 K)^2}{(\Omega + ik^2 M)} \right] w_{10} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

где $N^2 = -\frac{g}{\rho_0(0)} \frac{d\rho_0}{dz}$ – квадрат частоты Брента – Вайсяля.

Граничные условия имеют вид

$$w_{10}(0) = w_{10}(-H) = 0. \quad (12)$$

Остальные граничные условия в (6), (7) выполняются автоматически.

Краевая задача (11), (12) в [11, 12] решалась методом возмущений, когда решение и частота волны разлагались в ряд по малому параметру, пропорциональному значению горизонтальной турбулентной вязкости. В настоящей работе эта задача решается численно по неявной схеме Адамса третьего порядка точности. Сравнение дисперсионных кривых и зависимости декремента затухания волны от частоты для первых двух мод приводится ниже.

Нелинейные эффекты. Связь между скоростью течения в представлении Эйлера \mathbf{u} и Лагранжа \mathbf{u}_L с точностью до членов второго порядка по крутизне волны имеет следующий вид ⁴ [15]:

$$\mathbf{u}_L = \mathbf{u} + \left(\int_0^t \mathbf{u}_L d\tau \nabla \right) \mathbf{u}. \quad (13)$$

Данное интегральное уравнение решается методом итераций. С точностью до членов, квадратичных по амплитуде волны, после осреднения по периоду волны получается выражение для средней лагранжевой скорости ⁴:

$$\overline{\mathbf{u}_L} = \mathbf{U} + \overline{\left(\int_0^t \mathbf{u} d\tau \nabla \right) \mathbf{u}}, \quad (14)$$

где вектор $\mathbf{U}(U_0, V_0)$ – скорость среднего течения ($V_0 = 0$); \mathbf{u} – поле волновых эйлеровых скоростей, черта сверху означает осреднение по периоду волны. Скорость стокова дрейфа частиц жидкости представлена вторым слагаемым в (14) и определяется по следующей формуле ⁴ [15]:

$$\mathbf{u}_s = \overline{\left(\int_0^t \mathbf{u} d\tau \nabla \right) \mathbf{u}}. \quad (15)$$

Компоненты скорости стокова дрейфа вдоль и поперек направления распространения волны имеют вид [11, 14]

$$u_s = \frac{A_1 A_1^*}{k} \left[\frac{1}{\omega} \frac{d}{dz} \left(w_{10} \frac{dw_{10}^*}{dz} \right) + \text{c.c.} \right], \quad (16)$$

$$v_s = A_1 A_1^* \frac{i}{\omega} \frac{d}{dz} \left[\frac{w_{10}}{(\Omega^* - ik^2 K)} \left(\frac{f}{k} \frac{dw_{10}^*}{dz} \right) \right] + \text{c.c.}, \quad (17)$$

где $A_1 = A \exp(\delta \omega \cdot t)$, $\delta \omega = \text{Im}(\omega)$ – мнимая часть частоты, декремент затухания волны.

Из (8) – (10) следуют выражения для вертикальных волновых потоков импульса \overline{uw} , \overline{vw} [11, 14]:

$$\overline{uw} = \frac{i}{k} |A_1^2| \left(w_{10}^* \frac{dw_{10}}{dz} - w_{10} \frac{dw_{10}^*}{dz} \right), \quad (18)$$

$$\overline{vw} = \frac{w_{10}^* |A_1^2|}{(\Omega + ik^2 K)} \left(\frac{f}{k} \frac{dw_{10}}{dz} \right) + \text{c.c.} \quad (19)$$

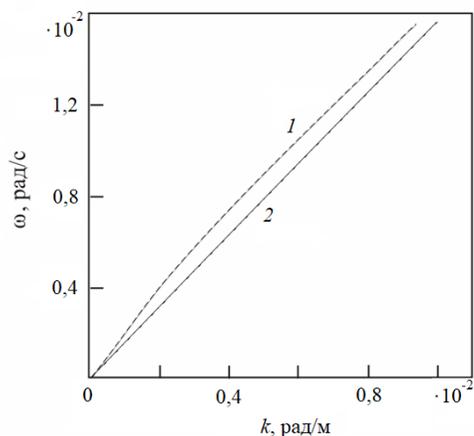
⁴ Дворянинов Г. С. Эффекты волн в пограничных слоях атмосферы и океана. Киев : Наукова думка, 1982. С. 25.

У инерционно-гравитационных внутренних волн поток импульса \overline{vw} отличен от нуля. Поток импульса \overline{iw} отличен от нуля только при наличии турбулентной вязкости и диффузии, в этом случае он не равен нулю и при неучете вращения Земли. Поперечная к направлению распространения волны компонента скорости стоковса дрейфа отлична от нуля для инерционно-гравитационных внутренних волн только при учете турбулентной вязкости и диффузии, если же вращение Земли не учитывать, то она равна нулю.

Результаты расчетов. Гибралтарский пролив соединяет Средиземное море с Атлантическим океаном. Воды Атлантического океана, менее соленые, с высокой скоростью входят в Гибралтарский пролив, располагаясь в верхнем 100-метровом слое. Глубже находятся более соленые воды, которые более медленно вытекают из Средиземного моря. На выходе из Гибралтарского пролива в Средиземное море формируется слой с резким перепадом скорости течения и плотности воды, соответствующие вертикальные профили скорости течения и стратификации показаны на рис. 1, *b*, *c* [16]. Полусуточный прилив, набегая из Атлантического океана на Гибралтарский пролив, генерирует внутренние волны. В частности, в ходе натурального эксперимента были обнаружены мощные волновые пакеты низшей моды внутренних волн с периодом 14 мин [16]. С целью выяснения вертикальной структуры внутренних волн краевая задача (11), (12) решается численно по неявной схеме Адамса третьего порядка точности при $K=2M$. На рассматриваемых масштабах типичное значение коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии составляет $M=1 \text{ м}^2/\text{с}$ [17]. Для фиксированной частоты волны волновое число и декремент затухания волны находятся методом пристрелки. Результаты численных расчетов сравниваются с результатами решения краевой задачи (11), (12) методом возмущений [12], когда решение и частота волны ищутся в виде ряда по малому параметру, пропорциональному горизонтальной турбулентной вязкости.

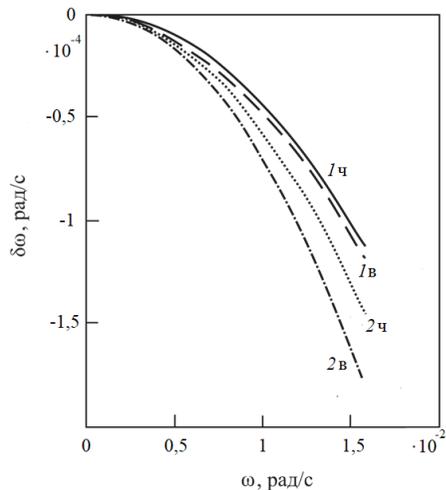
Из рис. 2 следует, что дисперсионные кривые, построенные методом возмущений и путем численного решения краевой задачи (11), (12), фактически совпадают. На рис. 3 показана зависимость мнимой части частоты волны от действительной части частоты для первой (1) и второй (2) мод, рассчитанных по методу возмущений (кривые 1в, 2в) и путем численного решения краевой задачи (11), (12) (кривые 1ч, 2ч). Метод возмущений дает завышенные значения модуля мнимой части частоты волны, для второй моды – бóльшие.

Нормирующий множитель A_1 находится по известной величине максимальной амплитуды вертикальных смещений [12]. Вертикальные волновые потоки импульса \overline{iw} (формула (18)) для 14-минутных внутренних волн первой моды с амплитудой 16 м, полученные как при численном решении краевой задачи (11), (12), так и при применении метода возмущений, показаны на рис. 4. Метод возмущений дает завышенные значения вертикального потока импульса \overline{iw} .



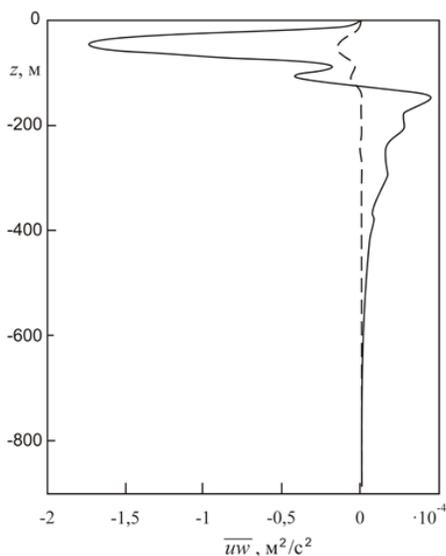
Р и с. 2. Дисперсионные кривые первой (1) и второй (2) мод внутренних волн

F i g. 2. Dispersion curves of the first (1) and second (2) modes of internal waves



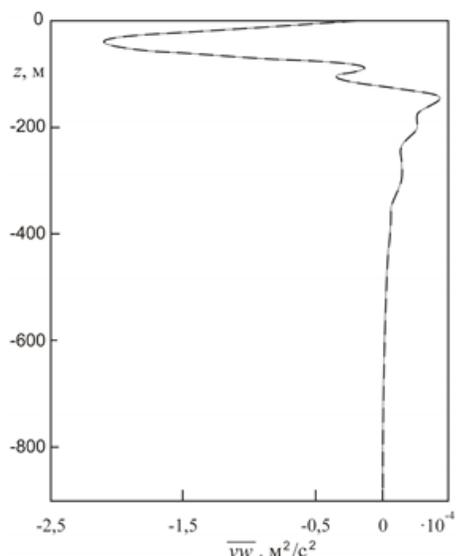
Р и с. 3. Зависимость декремента затухания от частоты волны, полученная методом возмущений (кривые 1в, 2в) и численным решением краевой задачи (кривые 1п, 2п)

F i g. 3. Dependence of the damping decrement upon the wave frequency obtained by the perturbation method (curves 1p, 2p) and by the numerical solution of the boundary problem (curves 1n, 2n)



Р и с. 4. Профили вертикального волнового потока импульса $\overline{u'w'}$, полученные методом возмущений (сплошная) и численным методом (штриховая)

F i g. 4. Profiles of the vertical wave flux of momentum $\overline{u'w'}$ obtained by the perturbation method (solid line) and by the numerical one (dashed line)

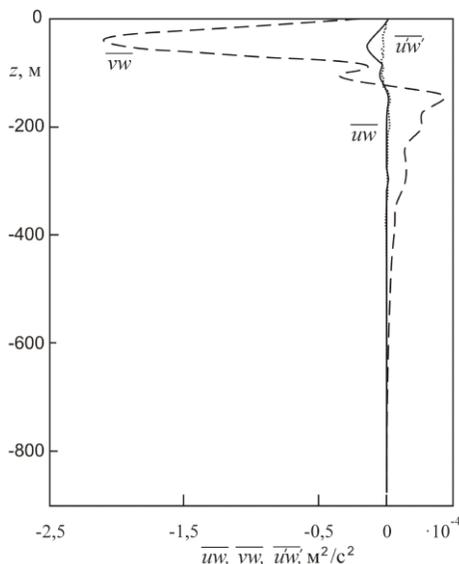


Р и с. 5. Профили вертикального волнового потока импульса $\overline{v'w'}$

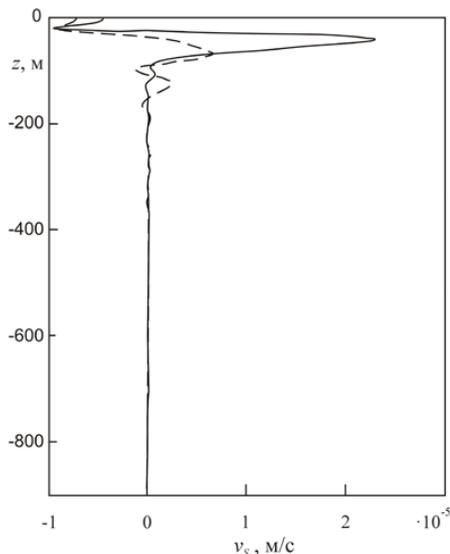
F i g. 5. Profiles of the vertical wave momentum flux $\overline{v'w'}$

Вертикальный волновой поток импульса \overline{vw} (формула (19)) показан на рис. 5. Метод возмущений и численный метод дают идентичные результаты, более того, на волновой поток \overline{vw} практически не влияют горизонтальная турбулентная вязкость и диффузия.

Волновые вертикальные потоки импульса \overline{uw} , \overline{vw} и соответствующий турбулентный поток $\overline{u'w'}$ сравниваются на рис. 6. Турбулентный поток импульса определяется по градиентной гипотезе: $\overline{u'w'} = -K_z \frac{dU_0}{dz}$. Коэффициент вертикального обмена в верхнем 150-метровом сильно стратифицированном слое обратно пропорционален частоте Брента – Вайсяля: $K_z = 8,4N_c^{-1} \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, здесь N_c соответствует частоте Брента – Вайсяля (цикл/ч) [18]. Глубже, где стратификация слабая, коэффициент турбулентного обмена пропорционален N_c [19]. В целом волновые потоки импульса по модулю превосходят турбулентный. Волновой поток \overline{vw} по абсолютной величине превосходит поток \overline{uw} .



Р и с. 6. Профили волновых (сплошная и штриховая) и турбулентного $\overline{u'w'}$ (пунктир) вертикальных потоков импульса
F i g. 6. Profiles of the wave (solid and dashed lines) and turbulent $\overline{u'w'}$ (dotted line) vertical momentum fluxes

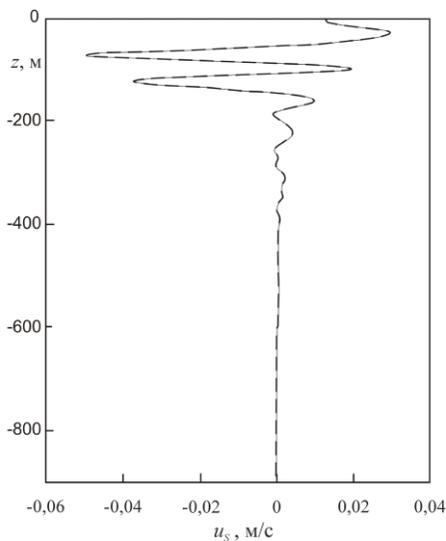


Р и с. 7. Вертикальные профили поперечной составляющей скорости стоковса дрейфа, полученные методом возмущений (сплошная) и численным решением краевой задачи (11), (12) (штриховая)
F i g. 7. Vertical profiles of transverse component of the Stokes drift velocity obtained by the perturbation method (solid line) and by the numerical solution of the boundary problem (11), (12) (dashed line)

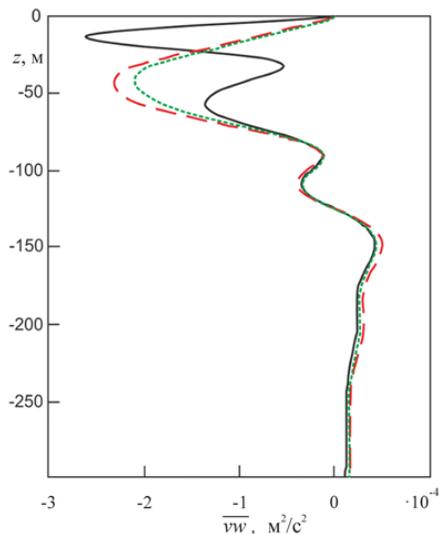
Вертикальные профили поперечной к направлению распространения волны составляющей скорости стоковса дрейфа v_s , рассчитанные методом возмущений и численным методом, показаны на рис. 7. Метод возмущений

дает завышенные значения в верхнем 70-метровом слое. При отсутствии турбулентной вязкости и диффузии $\nu_s = 0$.

Продольная компонента скорости стокова дрейфа u_s показана на рис. 8. Метод возмущений и численный метод дают идентичные результаты, причем турбулентная вязкость и диффузия на эту составляющую скорости стокова дрейфа практически влияния не оказывают. Продольная компонента скорости стокова дрейфа на три порядка больше поперечной.



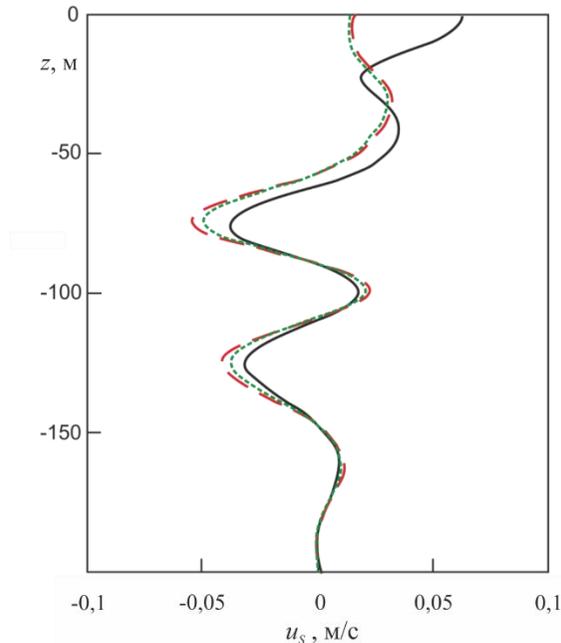
Р и с. 8. Вертикальные профили продольной компоненты скорости стокова дрейфа
F i g. 8. Vertical profiles of the longitudinal component of the Stokes drift velocity



Р и с. 9. Профили вертикального волнового потока импульса \overline{vw} при увеличенных коэффициентах турбулентного обмена, полученные методом возмущений (черная кривая), численным методом (красная кривая) и в невязком случае (зеленая кривая)
F i g. 9. Profiles of the vertical wave momentum flux \overline{vw} at the increased turbulent exchange coefficients obtained by the perturbation method (black curve), by the numerical one (red curve) and in the inviscid case (green curve)

Представляет все-таки интерес исследовать влияние турбулентной вязкости и диффузии на волновой поток импульса \overline{vw} и на скорость стокова дрейфа u_s при больших коэффициентах турбулентного обмена. На рис. 9 показаны профили вертикального волнового потока импульса \overline{vw} , рассчитанного по методу возмущений и численным методом при $M = 50 \text{ м}^2/\text{с}$, а также для невязкого случая при $M = K = 0$. Метод возмущений дает сильные искажения вертикального потока импульса в верхнем 70-метровом слое. Волновой поток импульса \overline{vw} , по данным численного расчета, несколько больше потока без учета турбулентной вязкости и диффузии.

На рис. 10 показаны вертикальные профили скорости стокова дрейфа u_s 14-минутных внутренних волн первой моды, рассчитанные методом возмущений, численным методом и для невязкого случая при $M = K = 0$. Метод возмущений дает заметное искажение скорости стокова дрейфа в верхнем 25-метровом слое.



Р и с. 10. Вертикальные профили скорости стокова дрейфа u_s при увеличенных коэффициентах турбулентного обмена, полученные методом возмущений (черная кривая), численным методом (красная кривая) и в невязком случае (зеленая кривая)

F i g. 10. Vertical profiles of the Stokes drift velocity u_s at the increased turbulent exchange coefficients obtained by the perturbation method (black curve), by the numerical one (red line) and in the inviscid case (green curve)

Численный расчет при учете турбулентной вязкости и диффузии дает несколько бóльшие по модулю значения скорости стокова дрейфа u_s по сравнению с невязким случаем, когда турбулентная вязкость и диффузия не учитываются.

Выводы

1. Вертикальный волновой поток импульса \overline{uw} при \overline{u} решении краевой задачи (11), (12) методом возмущений превышает поток \overline{uw} при решении этой задачи численным методом по неявной схеме Адамса третьего порядка точности.

2. Метод возмущений и численный метод дают идентичные результаты для вертикального волнового потока импульса \overline{vw} , причем учет горизонталь-

ной турбулентной вязкости и диффузии его практически не меняет. Аналогично скорость стокова дрейфа вдоль направления распространения волны практически нечувствительна к учету турбулентной вязкости и диффузии. Если коэффициенты турбулентного обмена увеличить в 50 раз, то метод возмущений даст заметную погрешность, особенно в верхнем слое. Численный расчет в этом случае показывает, что учет турбулентной вязкости и диффузии несколько увеличивает волновой поток импульса \overline{uv} и скорость стокова дрейфа u_s .

3. Метод возмущений для поперечной компоненты скорости стокова дрейфа дает завышенную оценку в верхнем 70-метровом слое, причем если турбулентную вязкость и диффузию не учитывать, то она равна нулю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов В. В., Владимиров Ю. В. Волны в стратифицированных средах. Москва : Наука, 2015. 735 с.
2. Коротаев Г. К., Пантелеев Н. А. Экспериментальные исследования гидродинамической неустойчивости в океане // Океанология. 1977. Т. XVII, вып. 6. С. 941–953.
3. Wunsch C., Ferrari R. Vertical Mixing, Energy, and the General Circulation of the Ocean // Annual Review of Fluid Mechanics. 2004. Vol. 36. P. 281–314. doi: 10.1146/annurev.fluid.36.050802.122121
4. Самодуров А. С., Любичкий А. А., Пантелеев Н. А. Вклад опрокидывающихся внутренних волн в структурообразование, диссипацию энергии и вертикальную диффузию в океане // Морской гидрофизический журнал. 1994. № 3. С. 14–27.
5. Коротаев Г. К., Пантелеев Н. А. Гидродинамическая неустойчивость внутренних волн в океане при нестационарном сдвиге // Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13, № 10. С. 1044–1054.
6. Подымов О. И., Зацепин А. Г., Островский А. Г. Вертикальный турбулентный обмен в черноморском пикноклине и его связь с динамикой вод // Океанология. 2017. Т. 57, № 4. С. 546–559. <https://doi.org/10.7868/S0030157417040049>
7. Пантелеев Н. А., Щербаков А. Н., Щербакова Е. Н. Наблюдение гидродинамической неустойчивости в океане // Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25, № 6. С. 616–626.
8. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. Москва : Мир, 1981. Ч. 2. 363 с.
9. LeBlond P. H. On the damping of internal gravity waves in a continuously stratified ocean // Journal of Fluid Mechanics. 1966. Vol. 25, iss. 1. P. 121–142. doi:10.1017/S0022112066000089
10. Островский Л. А., Соустова И. А. Верхний перемешанный слой океана как сток энергии внутренних волн // Океанология. 1979. Т. XIX, вып. 6. С. 973–981.
11. Слепышев А. А. Вертикальный перенос импульса внутренними волнами при учете турбулентной вязкости и диффузии // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 3. С. 342–350. doi:10.7868/S0002351516030111
12. Слепышев А. А., Носова А. В. Генерация вертикальной тонкой структуры внутренними волнами при учете турбулентной вязкости и диффузии // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 5–19. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-5-19
13. Анкудинов Н. О., Слепышев А. А. Вертикальный перенос импульса внутренними волнами в двумерном потоке // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2021. № 3. С. 39–47. doi:10.31857/S0568528121030026
14. Воротников Д. И., Слепышев А. А. Вертикальные потоки импульса, обусловленные слабонелинейными внутренними волнами на шельфе // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2018. № 1. С. 23–35. doi:10.7868/S0568528118010036

15. *Longuet-Higgins M. S.* On the transport of mass by time-varying ocean currents // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1969. Vol. 16, iss. 5. P. 431–447. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(69\)90031-X](https://doi.org/10.1016/0011-7471(69)90031-X)
16. *Watson G.* Internal Waves in a Stratified Shear Flow: The Strait of Gibraltar // *Journal of Physical Oceanography*. 1994. Vol. 24, iss. 2. P. 509–517. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1994\)024<0509:IWIASS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1994)024<0509:IWIASS>2.0.CO;2)
17. *Боуден К.* Физическая океанография прибрежных вод. Москва : Мир, 1988. 324 с.
18. Интенсификация вертикального турбулентного обмена в районах сопряжения шельфа и континентального склона в Черном море / В. А. Иванов [и др.] // *Доповіді Національної академії наук України*. 2008. № 6. С. 108–112.
19. *Самодуров А. С.* Взаимодополняемость различных подходов для оценки интенсивности вертикального турбулентного обмена в естественных стратифицированных бассейнах // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 37–48. doi:10.22449/0233-7584-2016-6-37-48

Об авторах:

Слепешев Александр Алексеевич, ведущий научный сотрудник, отдел турбулентности, ФГБУН ФИЦ МГИ (Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ResearcherID: V-6948-2017**, **ORCID ID: 0000-0002-9259-7558**, slep55@mail.ru

Носова Анна Владимировна, ведущий инженер-исследователь, отдел турбулентности, ФГБУН ФИЦ МГИ (Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2)

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.59

DOI: 10.22449/0233-7584-2022-4-372-388

Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений: математическое моделирование, системы поддержки принятия решений, геоинформационные системы (обзор)

Н. А. Яицкая^{1, 2, ✉}, А. А. Магаева²

¹ *Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр
Российской академии наук», Сочи, Россия*

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

Поступила в редакцию 27.12.2021; одобрена после рецензирования 20.04.2022;
принята к публикации 04.05.2022

Цель. Выполнен анализ современного состояния исследований и достижений в области опасных природных (в том числе гидрометеорологических) явлений и их ансамблей (мультиопасных явлений) на основе работ, опубликованных в профильных рейтинговых международных и российских научных журналах и монографиях.

Методы и результаты. Рассмотрены современные методы математического моделирования мультиопасных гидрометеорологических явлений, методы оценки взаимосвязей между опасными и мультиопасными явлениями, существующие системы поддержки принятия решений и методы оценки рисков возникновения опасных и мультиопасных природных явлений. Выполнен обзор ансамблевых моделей и возможностей облачных вычислений; исследован опыт интеграции геоинформационных систем и результатов дистанционного зондирования Земли в моделях. Представлены примеры разработки в разных странах платформ для моделирования и систем поддержки принятия решений при возникновении опасных явлений.

Выводы. Показано, что проблемы, связанные с прогнозированием, мониторингом и минимизацией последствий опасных природных явлений и их сочетаний, требуют междисциплинарных решений и взаимодействия между всеми заинтересованными сторонами – обществом, властью, наукой, бизнесом. Важно разрабатывать и внедрять планы по интегрированному управлению в регионах, особенно подверженных рискам. Первостепенное значение имеют данные натурных наблюдений. На страновом уровне необходима разработка комплексной системы моделирования для учета сложных процессов, какими являются опасные явления. Отдельно необходимо учитывать особенности стихийных бедствий, происходящих в северных районах нашей страны, для которых характерны зачастую экстремальные фоновые показатели погодных условий, труднодоступность и удаленность, отсутствие необходимой инфраструктуры для спасения людей и ликвидации последствий.

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

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-15-50320 (в части обзора систем поддержки принятия решений и оценки рисков возникновения опасных и мультиопасных природных явлений) и в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 122013100131-9 (в части обзора математических моделей мультиопасных гидрометеорологических явлений).

© Яицкая Н. А., Магаева А. А., 2022

Для цитирования: Яицкая Н. А., Магаева А. А. Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений: математическое моделирование, системы поддержки принятия решений, геоинформационные системы // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 4. С. 372–388. doi:10.22449/0233-7584-2022-4-372-388

Hydrometeorological Phenomena and Multi-Hazards: Mathematical Modelling, Decision Support Systems, Geoinformation Systems (Review)

N. A. Yaitskaya^{1, 2, ✉}, A. A. Magaeva²

¹ Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
Sochi, Russia

² Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, Russia
✉ yaitskayan@gmail.com

Abstract

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

Methods and Results. Considered are the modern methods for mathematical modeling of hydrometeorological multi-hazards, the methods for assessing the relations between the hazards and multi-hazards, the existing decision support systems, and the methods for assessing the risks of occurrence of hazards and multi-hazards. The ensemble models and the possibilities of cloud computing were reviewed; the experience of integrating the geoinformation systems and the results of the Earth remote sensing in models was studied. Examples of the modeling platforms and the decision support systems (developed in different countries) intended for application in case of the natural hazards, are represented.

Conclusions. It is shown that solution of the problems including forecasting, monitoring and minimizing the consequences of natural hazards and their combinations requires interdisciplinary solutions, on the one hand, and interaction between all the stakeholders – society, government, science and business, on the other. It is important to develop and implement an integrated management in the regions that are particularly at risk. Field observations are of primary importance. Within the framework of the country, an integrated modeling system taking into account complex processes such as hazards, should be necessarily developed. Special attention should be paid to the peculiarities of natural disasters occurring in the northern regions of our country, since they are often characterized by extreme background weather conditions, inaccessibility and remoteness, lack of the infrastructure required for saving people and eliminating the consequences.

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

Acknowledgements: the study was carried out at the RFBR financial support within the framework of scientific project No. 20-15-50320 (review of the decision support systems and the assessment of a risk of occurrence of natural hazards and multi-hazards), and within the framework of the state assignment of SSC RAS, project No. 122013100131-9 (review of mathematical models of hydrometeorological multi-hazards).

For citation: Yaitskaya, N.A. and Magaeva, A.A., 2022. Hydrometeorological Phenomena and Multi-Hazards: Mathematical Modelling, Decision Support Systems, Geoinformation Systems (Review). *Physical Oceanography*, 29(4), pp. 347-362. doi:10.22449/1573-160X-2022-4-347-362

Введение

В соответствии с отчетом Всемирного банка об основных очагах стихийных бедствий [1], около 3,8 млн км² земель и 790 млн человек в мире подвержены потенциальной угрозе возникновения минимум двух опасных явлений, МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 38 № 4 2022

около 0,5 млн км² и 105 млн человек – трех и более опасных явлений [2]. В отчете Организации Объединенных Наций¹ рассмотрены возможные угрозы возникновения нескольких стихийных бедствий для жителей городов (с населением 300 000 человек и более): например, в 2014 г. 100 млн человек проживало в районах, которые были подвержены высокому риску возникновения мультиопасных природных явлений, а 752 млн (34 % от всего городского населения) подвергались среднему или низкому риску [3].

Согласно специальному докладу «Управление рисками экстремальных явлений и бедствий для содействия адаптации к изменению климата» Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), приблизительно с 1950 г. наблюдается увеличение повторяемости природных опасностей.

Существует несколько типов экстремальных климатических явлений, которые, по мнению [4] МГЭИК, станут более частыми, распространенными или более интенсивными в большинстве частей мира в течение XXI в. К ним относятся периоды сильной жары, засухи и сильные дожди. Повышенный риск возникновения опасностей может также наблюдаться вследствие антропогенного воздействия², например изменение землепользования увеличило опасность лесных пожаров в Средиземноморье [5].

Интегрированное управление прибрежной зоной опирается на комплексные и тщательно продуманные меры, предлагаемые заинтересованными сторонами, и активное распространение информации на местном уровне. Это требует мониторинга, регулирования и ответственного управления. На современном этапе развития науки достоверное прогнозирование гидрометеорологических явлений возможно лишь с заблаговременностью 72 ч. Это значение объясняется в первую очередь оправдываемостью математических моделей, скоростью вычислений, количеством данных для верификации моделей.

Для эффективного прогнозирования опасностей и предотвращения их неблагоприятных последствий необходимо сосредоточить внимание на природе опасностей и рисков и их последствиях в пространственном масштабе как на региональном, так и на национальном уровне.

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

В настоящей работе на основе анализа отечественной и зарубежной научной литературы с 2005 г. рассмотрены следующие аспекты в изучении опасных и мультиопасных природных явлений:

1) математическое моделирование мультиопасных гидрометеорологических явлений;

¹ Risks of exposure and vulnerability to natural disasters at the city level: A global overview / D. Gu [et al.]. New York : UN, 2015. 40 p. (United Nations Technical Paper; No. 2015/2).

² Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation : special report of the intergovernmental panel on climate change / Eds. C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker [et al.]. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. 582 p. URL: <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/> (date of access: 19.04.2022).

- 2) использование облачных сервисов для моделирования опасных природных явлений, раннего предупреждения населения и управления рисками;
- 3) разработка системы поддержки принятия решений и оценки рисков возникновения опасных и мультиопасных природных явлений.

1. Материалы и методы

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

Основной объем информации получен из журналов «Океанология», «Водные ресурсы», «Метеорология и гидрология», «*Progress in Oceanography*», «*Mathematical Modeling*», «*Oceanologia*», «*Ocean Modelling*», «*Journal of Marine Systems*», «*Ocean and Coastal Management*», «*Marine Policy*», «*Coastal Engineering*», «*Cold Region Science and Technology*», «*International Journal of Disaster Risk Reduction*», «*Quaternary Science Reviews*», «*Environmental Impact Assessment Review*», «*Weather and Climate Extremes*», «*Journal of Environmental Management*» и др. Наибольшее количество научных статей найдено по оценке риска и управлению рисками, системам предупреждения и прогнозирования опасных природных явлений (ОПЯ), наводнениям, штормовому волнению. В литературный обзор вошло 224 научных работы на английском и 32 – на русском языке.

2. Математическое моделирование мультиопасных гидрометеорологических явлений

Для прогнозирования и эффективного управления стихийными бедствиями построен широкий спектр моделей. К ним относятся модели распространения наводнений *Swift* [6], *Rapid Flood Spreading Model (RFSM)* [7], модель прогнозирования оползней *LHASA* [8], модели циклонов (модель исследования и прогнозирования погоды ураганов *HWRF*)³ и многие другие [9]. Некоторые программные комплексы учитывают до трех типов опасных явлений, но как независимо происходящих (*HAZUS-MH* [10], *InaSAFE* [11] и *RiskScape* [12, 13]).

Для анализа опасных природных явлений климатические переменные могут быть получены из рядов наблюдений или из глобальных и региональных климатических реанализов, как было показано в предыдущей нашей работе⁴.

³ Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) model: 2011 scientific documentation / S. Gopalakrishnan [et al.]. 2011. 96 p.

⁴ Яицкая Н. А., Магаева А. А. Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений: нормативно-правовые аспекты, терминология и классификация (обзор) // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 256–275. doi:10.22449/0233-7584-2022-3-256-275

Это категории основных переменных (например, температура, осадки, скорость ветра), сложных переменных (таких как испарение или влажность), а также косвенных переменных (в частности, влажность почвы, расход рек или скорость потока) ⁵. Выбранные переменные должны быть репрезентативными и отражать не только пространственно-временную динамику, но и аномальные и экстремальные значения.

Более сложная задача – количественная оценка взаимосвязей между опасностями и расчет мультиопасностей. Для этого может применяться несколько типов вероятностных методологий (например, байесовские сети, анализ дерева событий, моделирование методом Монте-Карло), которые обычно используются для оценки природных опасностей.

Однако основной проблемой по-прежнему остаются неопределенности, связанные с будущими изменениями климата и вкладом этих изменений в характеристики ОПЯ. Решить эту проблему возможно, используя ансамбли глобальных и региональных моделей. Мультимодельные ансамбли создаются на основе результатов различных экспериментов по моделированию ⁶, характеризуются большей надежностью и согласованностью, чем одномодельные симуляции, и обеспечивают более высокий уровень достоверности климатических прогнозов для конкретного региона [14]. Наиболее широко используемыми для создания климатических сценариев являются модели общей циркуляции (см. работу ⁷ и [15–18]). Для получения корректных данных о глобальных климатических изменениях используется несколько различных сценариев, результаты расчетов по которым публикуются с периодичностью примерно пять лет в специальных отчетах [19].

3. Облачные вычисления и ансамблевое моделирование

Широкое внедрение геопространственных моделей и моделей природных опасностей, необходимость обработки все большего количества разнородной информации послужили причиной разработки и распространения методов облачных вычислений. Чрезвычайно сложный характер моделей, ресурсоемкость вычислений, особые временные требования при прогнозировании, потребность в масштабируемости для ансамблей моделей и ресурсоемкий характер геопространственных моделей – все это делает реализацию таких моделей сложным процессом [20].

Разработанные на основе принципов распределенных вычислений облачные вычисления возможно объединять, совместно использовать, интегрировать в них новейшие вычислительные технологии и физически распределенные компьютерные ресурсы [21]. Облачные вычисления обеспечивают доступ по запросу к практически неограниченным хранилищам, сетевым и вычислительным ресурсам. Эти возможности позволяют решать проблемы, связанные

⁵ Climate adaptation: Risk, uncertainty and decision-making : UKCIP Technical Report. Oxford : UKCIP, 2003. Part 2. P. 41–87.

⁶ URL: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/> (дата обращения: 20.07.2021).

⁷ Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. T. F. Stocker [et al.]. Cambridge : Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

с количеством исходных и полученных данных, объемом вычислений и одно-временным доступом к расчетам и результатам неограниченного количества пользователей.

В работе ⁸ С. Ён с соавторами использовали ГИС в сочетании с веб-технологиями при разработке инструмента поддержки принятия решений для определения эффективных стратегий реагирования на сильные землетрясения и оценки ожидаемых повреждений и потерь. В [22] Ф. Векс с соавторами предложили модель поддержки принятия решений, основанную на эвристике Монте-Карло с использованием географической информации для *NDM (Natural Disaster Management)*. Эта модель минимизировала сумму времени завершения инцидентов, взвешенную по серьезности инцидентов.

В работе [23] К. ван Вестен продемонстрировал, как ГИС может быть объединена со спутниковым мониторингом для разработки эффективных инструментов управления рисками возникновения стихийных бедствий для предотвращения последствий и обеспечения готовности к ОПЯ, оказания помощи пострадавшим и восстановления инфраструктуры на различных этапах бедствий. В [24] М. Лайгури и К. Кодрич объединили ГИС и возможности интернета, чтобы повысить эффективность реагирования на стихийные бедствия большой силы и управления последствиями от их возникновения. В [25] А. Джеясилан подтвердил эффективность использования ГИС, интегрированных с данными дистанционного зондирования Земли, для раннего предупреждения наводнений и засухи, мониторинга в реальном времени и оценки последующего ущерба. В своих работах Л. Манфре с соавторами [26] и Л. Монтойя [27] продемонстрировали эффективность использования ГИС вместе с дистанционным зондированием и соответствующими технологиями для более эффективного управления рисками возникновения стихийных бедствий и городскими рисками, в том числе на территории крупных городов. В [28] С. Каттер объяснил, в какой степени геоинформационная наука может использоваться сообществом для управления после стихийных бедствий.

Веб-технологии применяются для размещения информации различных служб, связанных со стихийными бедствиями, облегчения доступа к данным наблюдений, результатам реанализа и прогноза стихийных бедствий. Различные типы датчиков используются для сбора максимально возможного количества информации, чтобы получить более полное представление о бедствиях. В работе [29] описано применение спутниковых данных и эффективных методов анализа изображений для быстрого создания карт во время стихийных бедствий с целью улучшения управления рисками.

Некоторые геопространственные модели и модели опасностей требуют запуска большого количества симуляций, чтобы получить ряды статистических показателей, а не один детерминированный результат. Этот подход часто применяется, когда входные данные в модели подвержены влиянию источников неопределенности и могут быть выражены только в виде вероятностных распределений, а не фиксированных величин. Облачная среда хорошо подходит для поддержки ресурсоемких ансамблей моделей, требующих запуска от сотен

⁸ Web based decision support tool in order to response to strong earthquakes / C. Yong [et al.] // Proceedings of TIEM S2001. Oslo, Norway, 2001.

до тысяч имитаций. В работе [30] С. Гарг с соавторами исследовали возможность использования облачных вычислений для ансамблевого запуска моделей геопространственных наук, разработав сервис *SparkCloud* для программного обеспечения прогнозирования лесных пожаров *Spark*. В [21] К. Хуанг с коллективом соавторов разработали прототип платформы гибридных облачных вычислений (*Hybrid Cloud Computing*, сокр. *НСС*), которая позволяет использовать облачную инфраструктуру для ансамблевого запуска сложной модели, например модели пылевой бури, развернув параллельный режим модели на базе *Amazon EC2*, с меньшими затратами по сравнению с локальными ресурсными вычислениями. В [31] З. Ли с коллегами разработали сервис *MaaS (Model as a Service)*, который запускает ансамбль моделей параллельно с отдельными запросами от пользователей. Все необходимые данные для запуска ансамбля загружаются пользователями через веб-интерфейс. В [32] Б. Бехзад с соавторами разработали геоинформационную систему на основе киберинфраструктуры *CyberGIS Gateway* и представили с ее помощью ансамблевое моделирование системы подземных вод в облачной среде на базе платформы *Microsoft Windows Azure*.

4. Системы предупреждения

Многие системы раннего предупреждения были разработаны для оповещения населения об ОПЯ [33–37]. В [34] Д. Путал с группой исследователей представили разработку, поддерживающую обнаружение опасных явлений и формирование оповещений путем анализа потока больших данных в реальном времени. В [36] К. Росси с соавторами представили сервис-ориентированную облачную архитектуру для серверов мобильных приложений, дающую возможность отправлять данные полевых наблюдений в режиме реального времени. Эти данные могут использоваться для раннего предупреждения во время стихийных бедствий. Веб-платформа *Virtual Fire* [33] предоставляет жизненно важные данные о погоде, необходимые для предотвращения пожаров и раннего предупреждения населения в случае пожара. Облачная вычислительная платформа на базе местных общин, предложенная Д. Ли с коллективом соавторов [37], будет способствовать раннему предупреждению о стихийных бедствиях, разработке стратегии управления чрезвычайными ситуациями и поможет свести к минимуму последствия стихийного бедствия. В исследовании, проведенном А. Джеясилан [25], рассматривается использование дистанционного зондирования и ГИС для своевременного предупреждения населения в случае любых событий, связанных с засухой и наводнениями.

Проект *RiskMed (Weather Risk Reduction in the Mediterranean)*⁹ собрал различных партнеров из четырех регионов Средиземноморской Европы (Южная Италия, Мальта, Северо-Западная Греция и Кипр) с целью создания и настройки системы раннего предупреждения о неблагоприятных погодных условиях, которая продолжит работать и после завершения проекта.

Armagedom – инструмент анализа сейсмического риска, реализованный в различных городских сейсмических условиях (Бузареа (Алжир), четыре про-

⁹ URL: <http://www.riskmed.net> (date of access: 15.02.2021).

винции в Иране, французские департаменты, расположенные вдоль французо-испанской границы, и заморские департаменты на Французских Английских островах) [38].

Central American Probabilistic Risk Assessment – платформа, которая включает в себя инструменты моделирования и анализа различных типов ОПЯ, уязвимостей, оценки рисков и др. Использовалась для реализации различных проектов стран Центральной и Южной Америки. Платформа включает в себя модули для анализа землетрясений, ураганов, осадков, вулканических угроз, оползней и наводнений. Модуль оценки рисков включает *CAPRA-GIS* и программные приложения для вероятностной оценки рисков на основе данных об ОПЯ, воздействии и физической уязвимости ¹⁰.

В России для математического моделирования опасных природных явлений применяются авторские модели, как отечественные, так и зарубежные. В работе [39] на основе климатической версии негидростатической модели *COSMO (Consortium for Small-scale Modeling)* впервые для России выполнено численно интегрирование модели на 30 лет (1985–2014 гг.) и получены массивы гидрометеорологической информации для трех вложенных областей Охотского моря с разным масштабом, проведен синоптический анализ экстремальных ситуаций. Прогностическая версия модели *COSMO-Ru* используется Гидрометцентром России.

Примером разработки российской оперативной системы диагноза и морских прогнозов Мирового океана, Арктического и Азово-Черноморского бассейнов является система, реализованная в Государственном океанографическом институте имени Н. Н. Зубова (ГОИН) [40, 41]. Комплекс численных моделей состоит из региональной негидростатической модели атмосферной циркуляции *Weather Research and Forecasting (WRF) Model* ¹¹; трехмерной σ -модели морской циркуляции *Institute of Numerical Mathematics Ocean Model (INMOM)* и динамики морского льда в версии для Баренцева, Белого, Печорского и Карского морей; российской атмосферно-волновой модели (РАВМ). Негидростатическая модель атмосферной циркуляции *WRF* с пространственным разрешением 15 км способна воспроизводить мезомасштабные атмосферные процессы ¹². Все атмосферные параметры из модели *WRF* используются в модели морской циркуляции *INMOM* для расчета потоков тепла, пресной воды и импульса на поверхности моря.

¹⁰ URL: <https://ecapra.org/topics/risk-assessment> (date of access: 05.03.2021).

¹¹ A Description of the Advanced Research WRF Version 3 / W. C. Skamarock [et al.]. Boulder, Colorado : National Center for Atmospheric Research USA, 2008. 125 p. (NCAR Technical Notes). doi:10.5065/D68S4MVH

¹² Дианский Н. А., Панасенкова И. И., Фомин В. В. Исследование отклика верхнего слоя Баренцева моря на прохождение интенсивного полярного циклона в начале января 1975 года // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 6. С. 533. doi:10.22449/0233-7584-2019-6-530-548

5. Системы поддержки принятия решений и оценка рисков возникновения опасных и мультиопасных природных явлений.

Методы оценки рисков возникновения мультиопасных природных явлений

Концепция мультиопасных явлений связана с анализом различных соответствующих опасностей, триггерных и каскадных эффектов, угрожающих одним и тем же подверженным воздействию компонентам среды, с временным совпадением или без него. Методологии оценки риска возникновения мультиопасных явлений включают агрегирование опасностей, оценку уязвимости [42], присвоение баллов и весов выявленным классам [43]. Результаты позволяют качественно классифицировать уровень риска возникновения множественных опасностей (например, низкий, средний, высокий).

Термин «уязвимость» впервые появился в 1970-х гг. [44], когда уязвимость была указана как истинная причина бедствий наравне с естественными причинами возникновения ОПЯ. При этом не существует набора конкретных уязвимостей для различных объектов¹³. Как уже говорилось в нашей предыдущей работе⁴, уязвимость от ОПЯ отчасти определяется социальной уязвимостью населения. Так, бедные или развивающиеся сообщества несут больший ущерб от стихийных бедствий вследствие экономических и политических ограничений, ухудшения состояния окружающей среды [45].

На основе анализа современной научной литературы можно выделить два основных подхода к оценке опасностей: оценка рисков возникновения множества опасностей и оценка множества рисков. Эти подходы рассматривают одновременно опасность и уязвимость. Первый подход предусматривает анализ различных опасностей (с объединением их для расчета индекса множественных опасностей) и оценку общей территориальной уязвимости, что позволяет проводить оценку рисков возникновения множества опасностей. Процедуру оценки можно резюмировать следующим образом: оценка опасности; оценка множества опасностей; оценка подверженности опасности уязвимых элементов; оценка уязвимости; оценка риска возникновения множественных опасностей.

Второй подход – оценка множественных рисков – является более сложным и включает концепции множественных опасностей и множественной уязвимости с учетом возможных опасностей и взаимодействий уязвимостей [46]. При этом подходе риски анализируются отдельно для каждой опасности, а затем агрегирование позволяет провести оценку индекса множественного риска. В общем виде подход описывается следующей последовательностью: оценка опасности; оценка подверженности риску уязвимых элементов; оценка уязвимости; единая оценка риска; оценка множественных рисков.

Проект *H2020 ESPRESSO (Enhancing Synergies for Disaster Prevention in the European Union)* направлен на выявление существующих пробелов в исследованиях и ключевых приоритетов для научной работы в регионах, подверженных возникновению ОПЯ, снижение риска бедствий, управление рисками и адаптацию к изменению климата. Ключевые исследовательские приоритеты

¹³ Kohler A., Julich S., Bloemertz L. Guidelines: Risk analysis – a basis for disaster risk management. Eschborn : Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 2004. 31 p.

были сформулированы в Сендайской рамочной программе по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. и соответствующем Плане действий ЕС. Нововведение, представленное Сендайской рамочной программой, – это новое понимание риска, основанное не только на записях прошедших событий, но и на более точных прогнозах, которые отражают развивающиеся тенденции и динамику во времени и пространстве [47].

В проекте MATRIX¹⁴ предлагается три различных метода для описания и количественной оценки взаимодействий опасных явлений: дерево событий, байесовские сети и моделирование методом Монте-Карло с пошаговым временным шагом. Более того, отдельные риски в рамках оценки множественных рисков вычисляются с использованием общей единицы измерения (потеря жизней, экономические потери) (например, [4, 48]). Это позволяет проводить прямое сравнение и агрегирование различных видов рисков. В результате применения обоих подходов выделяют области, подверженные различным общим классам риска (например, [45, 49]). Пространственно-ориентированные карты могут использоваться различными конечными пользователями для получения конкретной информации о количественных показателях риска.

Для оценки риска возникновения мультиопасных природных явлений применяется метод *Multi-Hazard Risk Assessment (MHRA)*. Основным его преимуществом является то, что он объединяет различные типы опасностей в единую систему¹⁵ для совместной оценки (см. работу¹⁶ и [46]), учитывает параметры каждой природной опасности (вероятность, частота и величина), их взаимодействие и взаимосвязи (например, одна опасность может повторяться все время; разные опасности могут возникать независимо друг от друга или последовательно в одном и том же месте) [5].

Природоориентированные решения для снижения рисков концептуализированы совсем недавно¹⁷, но при этом показали многообещающие результаты

¹⁴ Garcia-Aristizabal A., Marzocchi W. Dictionary of the terminology adopted. Deliverable 3.2. MATRIX project (Contract n 265138). 2012. URL: https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Garcia-10/publication/255989333_Assessing_cascading_effects_in_multi-hazard_and_multi-risk_analyses_Examples_from_Naples_Italy/links/5a152ed0aca27273c9eb20c4/Assessing-cascading-effects-in-multi-hazard-and-multi-risk-analyses-Examples-from-Naples-Italy.pdf (date of access: 12.07.2022).

¹⁵ Armonia – Applied Multi-Risk Mapping of Natural Hazards for Impact Assessment. Available at: <http://www.armoniaproject.net/> (date of access: 12.12.2020); Delmonaco G., Margottini C., Spizzichino D. Report on new methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural risk maps. (Del. 3.1). Rome, 2006. 85 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/317957266_New_methodology_for_multi-risk_assessment_and_the_harmonisation_of_different_natural_risk_maps (date of access: 12.07.2022).

¹⁶ Principles of multi-risk assessment: interactions amongst natural and man-induced risks / W. Marzocchi [et al.]. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2009. 72 p.

¹⁷ Biodiversity, climate change, and adaptation: nature-based solutions from the World Bank portfolio. Washington, DC : The World Bank, 2008. 112 p. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/6216> (date of access: 14.07.2022); Rizvi A. R. Nature based solutions for human resilience: a mapping analysis of IUCN's ecosystem based adaptation projects. Gland, Switzerland : IUCN, 2014. 50 p.

в деле уменьшения угроз и сохранения биоразнообразия¹⁸. Однако такие подходы необходимо утвердить в качестве рекомендуемых мер по снижению риска.

Природоориентированные решения рассматриваются в качестве зонтичной концепции, которая включает в себя различные экосистемные подходы¹⁶, такие как экосистемная адаптация (*Ecosystem-based Adaptation*, сокр. *EbA*), экосистемное снижение риска бедствий (*Ecosystem based Disaster Risk Reduction*, сокр. *Eco-DRR*), развитие зеленой инфраструктуры, используемой для решения проблемы экологической деградации, снижения рисков возникновения стихийных бедствий и адаптации к изменению климата [50].

Общие принципы природоориентированных решений заключаются в обеспечении баланса между сохранением экосистемы и социально-экономическими выгодами на справедливой равноправной основе при широком участии общества. ОПЯ, риски их возникновения и адаптация к климатическим изменениям являются центральными для таких экосистемно-ориентированных подходов, как экосистемный подход к снижению риска бедствий (*Eco-DRR*), экосистемный подход к адаптации (*EbA*), зеленая инфраструктура (*Green Infrastructure*) и природная инфраструктура (*Nature Infrastructure*) [50]. Конкретные результаты реализации отдельных элементов природоориентированных решений для снижения уязвимости социально-экологических систем перед стихийными бедствиями пока не зафиксированы.

Одновременно с разработкой Международным союзом охраны природы (МСОП) принципов природоориентированных решений Всемирный банк предложил комплексные руководящие принципы по внедрению этих решений для снижения риска наводнений [51]. В этом руководстве предлагается в качестве одного из пяти всеобъемлющих принципов до принятия окончательного решения о подходах к снижению рисков проводить оценку рисков наводнений и преимуществ полного набора решений, не ограничиваясь только экологическими решениями. Наконец, в 2019 г. была опубликована Конвенция о биологическом разнообразии (*CBD*), содержащая добровольные руководящие принципы экосистемных подходов к адаптации к изменению климата и снижению риска бедствий. Все эти частично совпадающие, а иногда и взаимодополняющие наборы принципов и руководящих указаний имеют отношение к принятию природообоснованных решений в глобальном масштабе, поскольку они устраняют пробелы в знаниях и обеспечивают четкое руководство для лиц, принимающих решения по планированию и реализации природосберегающих технологий в контексте изменения климата, а также снижению риска возникновения ОПЯ [50].

Системы поддержки принятия решений (СППР) на основе моделей широко используются для поддержки управления окружающей средой в экологической, социальной и экономической сферах. Например, СППР были разработаны для устойчивого управления рыболовством [51]; сельским хозяйством и другими агросистемами [52]; управления средой обитания и экосистемами [53, 54]; освоения земель [52, 55]; планирования деятельности сообщества [14,

¹⁸ Nature-based solutions to address global societal challenges / Eds. E. Cohen-Shacham [et al.]. Gland, Switzerland : IUCN, 2016. 97 p. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
382

56, 57]; управления водными ресурсами с учетом рек, озер, водно-болотных угодий, водохранилищ и их водосборных бассейнов [58, 59] и управления загрязнениями [12, 60].

Преимущество применения СППР для решения задач заключается в том, что с их помощью можно:

1) сосредоточить внимание на долгосрочных и стратегических вопросах [61];

2) учитывать групповое взаимодействие [62];

3) содействовать эффективному принятию решений в сложных, плохо структурированных задачах, которые имеют множество действующих лиц, факторов и взаимосвязей и характеризуются высокой неопределенностью и противоречивыми интересами участников [63];

4) включить интуитивно понятные интерфейсы, обеспечивающие взаимодействие между конечными пользователями и программным обеспечением [64];

5) интегрировать междисциплинарные данные и знания о процессе [52];

6) работать в различных временных и пространственных масштабах [52, 64];

7) адекватно оценивать динамику внутри системы, включая обратные связи [52];

8) использовать при построении гибкие и модульные программы, которые можно эффективно поддерживать, расширять и адаптировать к аналогичным тематическим исследованиям [65].

Заключение

При решении задач прогнозирования опасных гидрометеорологических явлений и предотвращения их возникновения необходимо опираться на опыт уже произошедших событий – анализ баз данных, публикации документов государственных организаций, страховых компаний и частных архивов (дореволюционные наблюдения). Первостепенное значение имеют натурные наблюдения, разработка сети станций с широким пространственным охватом, еще большее развитие судовых наблюдений и регулярный дистанционный мониторинг ключевых переменных или индикаторов природных опасностей. Это позволит получать оперативные сведения, проводить фундаментальные исследования физических механизмов стихийных бедствий и использовать эти данные для верификации и ассимиляции численных моделей.

На страновом уровне необходима разработка комплексной системы моделирования для учета сложных процессов взаимодействия, например взаимодействия атмосферы и океана, волн и течений, гидродинамического и морфодинамического взаимодействия, а также применение методики вложенных моделей для крупномасштабных исследований динамики процессов.

Отдельно необходимо учитывать особенности стихийных бедствий, происходящих в северных районах нашей страны, для которых характерны зачастую экстремальные фоновые показатели погодных условий, труднодоступность и удаленность, отсутствие необходимой инфраструктуры для спасения

людей и ликвидации последствий. Методы, применяемые при управлении рисками возникновения стихийных бедствий, не являются универсальными, поэтому знания и опыт, накопленные в результате возникновения ОПЯ в более теплых районах, нельзя слепо переносить на стихийные бедствия, произошедшие в холодных условиях.

Мы полагаем, что в ближайшие 50 лет при активном развитии синергии в науке, внедрении квантовых вычислений и удешевлении космических наблюдений достоверность прогнозирования ОГЯ и их ансамблей улучшится, а сроки предсказаний увеличатся.

При этом нельзя недооценивать важность работ по исследованию фундаментальных климатических процессов и явлений. Для этого необходима подготовка квалифицированных специалистов по соответствующим специальностям с классическими фундаментальными знаниями метеорологии, гидрологии, океанологии, биологии, физике, математике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Natural disaster hotspots: A global risk analysis / M. Dille [et al.]. Washington, DC : World Bank, 2005. 132 p. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7376> (date of access: 19.04.2022).
2. A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment / V. Gallina [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2016. Vol. 168. P. 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011>
3. Curt C. Multirisk: What trends in recent works? – A bibliometric analysis // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 763. 142951. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142951>
4. Multi-hazard risk assessment using GIS in urban areas: a case study for the city of Turrialba, Costa Rica / C. J. van Westen [et al.] // *Proceedings of the regional workshop on Best Practices in Disaster Mitigation (Bali, Indonesia, 22–24 September, 2002)*. Bali, 2002. P. 120–136.
5. Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy / W. Marzocchi [et al.] // *Natural Hazards*. 2012. Vol. 62, iss. 2. P. 551–573. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0092-x>
6. Swift: A GPU based coupled hydrodynamic/hydraulic framework for urban flood prediction / R. Cohen [et al.] // *Proceeding of the Eleventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. Melbourne, Australia : CSIRO, 2015. P. 1–6.
7. Recent development and application of a rapid flood spreading method / J. Lhomme [et al.] // *Flood Risk Management: Research and Practice*. London : Taylor & Francis Group, 2009. P. 15–24.
8. Role of earth observation data in disaster response and recovery: from science to capacity building / G. Schumann [et al.] // *Earth Science Satellite Applications*. Cham : Springer, 2016. P. 119–146. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33438-7_5
9. Cloud Computing in natural hazard modeling systems: Current research trends and future directions / K. Ujjwal [et al.] // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2019. Vol. 38. 101188. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101188>
10. Schneider P. J., Schauer B. A. HAZUS—its development and its future // *Natural Hazards Review*. 2006. Vol. 7, iss. 2. P. 40–44. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2006\)7:2\(40\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2006)7:2(40))
11. Pranantyo I. R., Fadmastuti M., Chandra F. InaSAFE applications in disaster preparedness // *AIP Conference Proceedings*. 2015. Vol. 1658, iss. 1. 060001. <https://doi.org/10.1063/1.4915053>
12. Newham L. T. H., Jakeman A. J., Letcher R. A. Stakeholder participation in modelling for integrated catchment assessment and management: An Australian case study // *International Journal of River Basin Management*. 2007. Vol. 5, iss. 2. P. 79–91. <https://doi.org/10.1080/15715124.2007.9635308>

13. Quantitative multi-risk analysis for natural hazards: a framework for multi-risk modelling / J. Schmidt [et al.] // *Natural Hazards*. 2011. Vol. 58, iss. 3. P. 1169–1192. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9721-z>
14. *Hagedorn R., Doblas-Reyes F. J., Palmer T. N.* The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting – I. Basic concept // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2005. Vol. 57, iss. 3. P. 219–233. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v57i3.14657>
15. Multi-criteria evaluation of CMIP5 GCMs for climate change impact analysis / A. Ahmadi-lipour [et al.] // *Theoretical and Applied Climatology*. 2017. Vol. 128, iss. 1–2. P. 71–87. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1695-4>
16. *Raju K. S., Kumar D. N.* Impact of climate change on water resources with modeling techniques and case studies. Singapore: Springer, 2018. 266 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-6110-3>
17. Impact of global climate change on stream low flows: A case study of the Great Miami River watershed, Ohio, USA / S. Shrestha [et al.] // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019. Vol. 12, no. 1. P. 84–95.
18. Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran / M. Zarghami [et al.] // *Global and Planetary Change*. 2011. Vol. 78, iss. 3–4. P. 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.003>
19. Large-scale flood hazard assessment under climate change: A case study / A. Shadmehri Toosi [et al.] // *Ecological Engineering*. 2020. Vol. 147. 105765. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105765>
20. Spatial cloud computing: how can the geospatial sciences use and help shape cloud computing? / C. Yang [et al.] // *International Journal of Digital Earth*. 2011. Vol. 4, iss. 4. P. 305–329. <https://doi.org/10.1080/17538947.2011.587547>
21. *Huang Q., Li J., Li Z.* A geospatial hybrid cloud platform based on multi-sourced computing and model resources for geosciences // *International Journal of Digital Earth*. 2018. Vol. 11, iss. 12. P. 1184–1204. <https://doi.org/10.1080/17538947.2017.1385652>
22. Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units / F. Wex [et al.] // *European Journal of Operational Research*. 2014. Vol. 235, iss. 3. P. 697–708. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.029>
23. *Van Westen C. J.* Remote sensing for natural disaster management // *International archives of photogrammetry and remote sensing*. 2000. Vol. 33, part B7. P. 1609–1617. URL: https://www.isprs.org/proceedings/xxxiii/congress/part7/1609_XXXIII-part7.pdf (date of access: 25.03.2022).
24. *Laituri M., Kodrich K.* On line disaster response community: People as sensors of high magnitude disasters using internet GIS // *Sensors*. 2008. Vol. 8, iss. 5. P. 3037–3055. <https://doi.org/10.3390/s8053037>
25. *Jeyaseelan A. T.* Droughts & floods assessment and monitoring using remote sensing and GIS // *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology: Proceedings of the Training Workshop, 7–11 July, 2003, Dehra Dun, India*. Geneva: WMO, 2004. P. 291–313. URL: <http://www.wamis.org/agm/pubs/agm8/Paper-14.pdf> (date of access: 25.03.2022).
26. An analysis of geospatial technologies for risk and natural disaster management / L. A. Manfré [et al.] // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2012. Vol. 1, no. 2. P. 166–185. <https://doi.org/10.3390/ijgi1020166>
27. *Montoya L.* Geo-data acquisition through mobile GIS and digital video: an urban disaster management perspective // *Environmental Modelling & Software*. 2003. Vol. 18, iss. 10. P. 869–876. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00105-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00105-1)
28. *Cutter S. L.* GI science, disasters, and emergency management // *Transactions in GIS*. 2003. Vol. 7, iss. 4. P. 439–446. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00157>
29. Satellite image analysis for disaster and crisis-management support / S. Voigt [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007. Vol. 45, no. 6. P. 1520–1528. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.895830>

30. SparkCloud: a cloud-based elastic bushfire simulation service / S. Garg [et al.] // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, iss. 1. P. 74. <https://doi.org/10.3390/rs10010074>
31. Building Model as a Service to support geosciences / Z. Li [et al.] // *Computers, Environment and Urban Systems*. 2017. Vol. 61, part B. P. 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.06.004>
32. Integrating CyberGIS gateway with Windows Azure: a case study on MODFLOW groundwater simulation / B. Behzad [et al.] // *Proceedings of the ACM SIGSPATIAL Second International Workshop on High Performance and Distributed Geographic Information Systems*. Chicago : Association for Computing Machinery, 2011. P. 26–29. doi:10.1145/2070770.2070774
33. Virtual Fire: A web-based GIS platform for forest fire control / K. Kalabokidis [et al.] // *Ecological Informatics*. 2013. Vol. 16. P. 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.04.007>
34. A secure big data stream analytics framework for disaster management on the cloud / D. Puthal [et al.] // 2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS). IEEE, 2016. P. 1218–1225. <https://doi.org/10.1109/HPCC-SmartCity-DSS.2016.0170>
35. *Al-Fares M., Loukissas A., Vahdat A.* A scalable, commodity data center network architecture // *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2008. Vol. 38, iss. 4. P. 63–74. <https://doi.org/10.1145/1402946.1402967>
36. *Rossi C., Heyi M. H., Scullino F.* A service oriented cloud-based architecture for mobile geolocated emergency services // *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2017. Vol. 29, iss. 11. e4051. <https://doi.org/10.1002/cpe.4051>
37. Community-based cloud for emergency management / J. Li [et al.] // 2011 6th International Conference on System of Systems Engineering. IEEE, 2011. P. 55–60. <https://doi.org/10.1109/SYBOSE.2011.5966573>
38. Armageddon – a tool for seismic risk assessment illustrated with applications / O. Sedan [et al.] // *Journal of Earthquake Engineering*. 2013. Vol. 17, iss. 2. P. 253–281. <https://doi.org/10.1080/13632469.2012.726604>
39. Мезомасштабное моделирование экстремальных ветров над Охотским морем и островом Сахалин / А. В. Кислов [и др.] // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54, № 4. С. 381–385. doi:10.1134/S0002351518040090
40. *Дианский Н. А., Панасенкова И. И., Фомин В. В.* Исследование отклика верхнего слоя Баренцева моря на прохождение интенсивного полярного циклона в начале января 1975 года // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 6. С. 530–548. doi:10.22449/0233-7584-2019-6-530-548
41. Циркуляция воды северо-восточного побережья острова Сахалин при прохождении трех типов глубоких циклонов над Охотским морем / Н. А. Дианский [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 1. С. 45–58.
42. *Fleischhauer M.* Spatial relevance of natural and technological hazards // *Natural and technological hazards and risks affecting the spatial development of European regions*. Vammalan Kirjapaino Oy : Geological Survey of Finland, 2006. P. 7–16. (Geological Survey of Finland ; special paper 42).
43. *Wipulanusat W., Nakrod S., Prabnarong P.* Multi-hazard risk assessment using GIS and RS applications: a case study of Pak Phanang Basin // *Walailak Journal of Science and Technology*. 2009. Vol. 6, iss. 1. P. 109–125. doi:10.2004/wjst.v6i1.76
44. *O'Keefe P., Westgate K., Wisner B.* Taking the Naturalness out of Natural Disasters // *Nature*. 1976. Vol. 260. P. 566–567. <https://doi.org/10.1038/260566a0>
45. Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness / F. H. Norris [et al.] // *American Journal of Community Psychology*. 2008. Vol. 41, iss. 1–2. P. 127–150. <https://doi.org/10.1007/s10464-007-9156-6>
46. A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: first application / A. Carpignano [et al.] // *Journal of Risk Research*. 2009. Vol. 12, iss. 3–4. P. 513–534. <https://doi.org/10.1080/13669870903050269>

47. *Zuccaro G., Leone M. F., Martucci C.* Future research and innovation priorities in the field of natural hazards, disaster risk reduction, disaster risk management and climate change adaptation: a shared vision from the ESPRESSO project // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020. Vol. 51. 101783. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101783>
48. *Loat R.* Risk management of natural hazards in Switzerland. Bern, 2010. 15 p. URL: https://www.sistemaprotezionecivile.it/allegati/1149_Svizzera_Risk_Management.pdf (date of access: 01.05.2022).
49. *Bell R., Glade T.* Multi-hazard analysis in natural risk assessments // *Risk Analysis IV / Edited by C. A. Brebbia*. WIT Press, 2004. P. 197–206. (WIT Transactions on Ecology and the Environment ; vol. 77). URL: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/77/14298> (date of access: 19.04.2022). doi:10.2495/RISK040181
50. A review of hydro-meteorological hazard, vulnerability, and risk assessment frameworks and indicators in the context of nature-based solutions / M. A. R. Shah [et al.] // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020. Vol. 50. 101728. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101728>
51. *Carrick N. A., Ostendorf B.* Development of a spatial Decision Support System (DSS) for the Spencer Gulf penaeid prawn fishery, South Australia // *Environmental Modelling & Software*. 2007. Vol. 22, iss. 2. P. 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.025>
52. Integrated assessment of agricultural policies with dynamic land use change modelling / H. van Delden [et al.] // *Ecological Modelling*. 2010. Vol. 221, iss. 18. P. 2153–2166. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.03.023>
53. A decision support system for environmental effects monitoring / W. G. Booty [et al.] // *Environmental Modelling & Software*. 2009. Vol. 24, iss. 8. P. 889–900. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.02.001>
54. The WILDSPACE™ decision support system / I. W. Wong [et al.] // *Environmental Modelling & Software*. 2003. Vol. 18, iss. 6. P. 521–530. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00027-6)
55. Simulating urban development scenarios for Wuhan / Y. Shi [et al.] // 2012 6th International Association for China Planning Conference (IACP). IEEE, 2012. P. 1–13. <https://doi.org/10.1109/IACP.2012.6342974>
56. Моделирование штормового волнения в Баренцевом море / С. А. Мысленков [и др.] // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2015. № 6. С. 65–75. URL: https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/195?locale=ru_RU (дата обращения: 12.12.2020).
57. *Nafziger J., She Y., Hicks F.* Dynamic river ice processes in a river delta network // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 158. P. 275–287. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.09.005>
58. Decision support system development for integrated management of European coastal lagoons / M. Casini [et al.] // *Environmental Modelling & Software*. 2015. Vol. 64. P. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.008>
59. *Mysiak J., Giupponi C., Rosato P.* Towards the development of a decision support system for water resource management // *Environmental Modelling & Software*. 2005. Vol. 20, iss. 2. P. 203–214. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.12.019>
60. Decision support systems for risk-based management of contaminated sites / A. Marcomini, G. W. Suter II, A. Critto (eds.). New York : Springer, 2008. 436 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09722-0>
61. *Коронкевич Н. И., Барabanова Е. А., Зайцева И. С.* Наиболее опасные проявления экстремальных гидрологических ситуаций на территории России // *Известия РАН. Серия географическая*. 2010. № 6. С. 40–47.
62. *Geertman S., Stillwell J.* Planning support systems: an introduction // *Planning support systems in practice / S. Geertman, J. Stillwell (eds.)*. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2003. P. 3–22. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24795-1_1

63. *McIntosh B. S., Seaton R. A. F., Jeffrey P.* Tools to think with? Towards understanding the use of computer-based support tools in policy relevant research // *Environmental Modelling & Software*. 2007. Vol. 22, iss. 5. P. 640–648. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.015>
64. How can we make progress with decision support systems in landscape and river basin management? Lessons learned from a comparative analysis of four different decision support systems / *M. Volk [et al.]* // *Environmental Management*. 2010. Vol. 46, iss. 6. P. 834–849. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9417-2>
65. *Argent R. M.* An overview of model integration for environmental applications—components, frameworks and semantics // *Environmental Modelling & Software*. 2004. Vol. 19, iss. 3. P. 219–234. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00150-6](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00150-6)

Сведения об авторах:

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

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

Изменчивость температуры воды и воздуха вдоль побережья Восточного Приморья и Хабаровского края по данным наблюдений на гидрометеорологических станциях

Л. А. Гайко

*Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия*

✉ gayko@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.01.2022; одобрена после рецензирования 12.04.2022;
принята к публикации 04.05.2022.

Цель. В продолжение ведения температурного мониторинга выявить особенности динамики внутри- и межгодового хода температуры воды и воздуха вдоль северо-западного берега Японского моря и западного берега Татарского пролива за период 1950–2020 гг. – цель данной работы *Методы и результаты.* По данным наблюдений на трех гидрометеорологических станциях (ГМС): Рудная Пристань, Сосуново и Советская Гавань (из фонда Приморского УГМС), расположенных вдоль морского побережья, проведено исследование пространственно-временной структуры среднемесячной температуры воды и воздуха. При сравнении распределения температуры внутри года выявлено, что в отдельные месяцы на станциях, расположенных севернее, она может быть выше, чем на станциях, расположенных южнее, т. е. между станциями нарушается зональность в распределении температуры. Сравнение аномалий температур от базовой и оперативной климатических норм, вычисленных соответственно для периодов 1961–1990 и 1981–2010 гг. (рекомендованных Всемирной метеорологической организацией), показало, что температуры воды и воздуха на станциях в основном были ниже оперативной, но выше базовой нормы. При исследовании межгодовой изменчивости температур с помощью регрессионного анализа значимый на 5%-ном уровне положительный линейный тренд был выявлен: в ходе температуры воды – на ГМС Советская Гавань и Сосуново, температуры воздуха – на всех ГМС. Показано, что на станциях отмечен рост не только среднегодовых значений температуры, но и по сезонам, только с различной скоростью. Наибольшее повышение температуры воды на станциях происходит в теплый сезон, с максимумом на ГМС Сосуново (0,24°C / 10 лет), температуры воздуха – в холодный сезон, с максимумом на ГМС Советская Гавань (0,31°C / 10 лет). С помощью интегральных кривых аномалий температур от среднего многолетнего начиная примерно с 1950 г. были выделены длительные тенденции понижения температуры воды и воздуха до 1986–1988 гг., после чего происходит резкий подъем интегральной кривой до 1995 г., затем рост температуры приостанавливается до 2001 г. и вновь идет подъем до 2020 г.

Выводы. В целом за исследуемый период на побережье Восточного Приморья и Хабаровского края с 50-х гг. прошлого века преобладали в основном отрицательные аномалии температуры воды и воздуха, а с конца 80-х гг. вплоть до 2020 г. стали доминировать положительные аномалии. Рост температуры в современный период в этом регионе характеризуется устойчивым статистически значимым положительным линейным трендом и увеличением климатических норм, т. е. прослеживается тенденция повышения температуры вдоль всего побережья.

Ключевые слова: аномалии температуры, гидрометеорологические станции, климатические нормы, региональный климат, температура поверхностного слоя морской воды, температура воздуха, температурный тренд, Татарский пролив, Японское море

© Гайко Л. А., 2022

Благодарности: работа выполнена в рамках госбюджетной темы ТОИ ДВО РАН, № регистрации 121021700346-7. Автор выражает благодарность руководству и сотрудникам Приморского территориального управления по гидрометеорологии и контролю природной среды за представленные архивные материалы, а также благодарит рецензента и редакторов журнала за высказанные конструктивные замечания.

Для цитирования: Гайко Л. А. Изменчивость температуры воды и воздуха вдоль побережья Восточного Приморья и Хабаровского края по данным наблюдений на гидрометеорологических станциях // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 4. С. 389–404. doi:10.22449/0233-7584-2022-4-389-404

Variability of Water and Air Temperature along the Coast of the Eastern Primorye and Khabarovsk Territory Based on the Weather Station Data

L. A. Gayko

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
✉ gayko@yandex.ru

Abstract

Purpose. The study is aimed at identifying (within the framework of continuous temperature monitoring) the features of annual and interannual dynamics of water and air temperature along the northwest coast of the Sea of Japan and the western coast of the Tatarsky Strait in 1950–2020.

Methods and Results. Spatial-temporal structure of the monthly average water and air temperature was analyzed based on the data obtained at the coastal weather stations, namely Rudnaya Pristan, Sosunovo and Sovetskaya Gavan (the Primorsky TWSD archive). Comparison of the intra-annual temperature distribution revealed the fact that in particular months, at the stations located to the north, it can be higher than that at the stations located to the south. In other words, the latitudinal temperature distribution correlation between the weather stations was broken, which was probably due to the local water circulation. Having been compared, the temperature anomalies calculated by the basic (1961–1990) and current (1981–2010) climatic normals (recommended by WMO for each station and medium) showed that both water and air temperature at the stations were mostly lower than the current normal, yet above the basic one. The regression analysis of interannual temperature variability revealed a positive linear trend with the 5% confidence level in the water temperature dynamics at the Sovetskaya Gavan and Sosunovo weather stations, and in the air temperature dynamics – at all the weather stations. It is shown that the coastal weather stations recorded increase not only of the temperature annual average values, but also of the seasonal ones, although at different rates. At the coastal stations, the water temperature increase is the highest during a warm season with its maximum at the Sosunovo weather station (0.24°C / 10 years), whereas that of the air temperature – during a cold season with its maximum at the Sovetskaya Gavan weather station (0.31°C / 10 years). The integral curves of temperature anomalies against the mean multi-year value were used to identify long-term trends of the water and air temperature decrease starting from around 1950 up to 1986–1988, that was followed by abrupt ascend of the integral curve till 1995. Then the temperature increase suspended up to 2001 and further ascended till 2020.

Conclusions. On the whole over the studied period, at the coast of the eastern Primorye and Khabarovsk territory, mainly negative anomalies of the water and air temperature were predominant starting from the 50ies of the last century, whereas from the late 80ies up to 2020, the positive anomalies dominated. At present temperature rise in the region under study is characterized by a stable statistically significant positive linear trend and by an increase in the climatic normals, i.e. a tendency to temperature increase along the whole coast is observed.

Keywords: temperature anomaly, coastal weather station, climatic normal, regional climate, water temperature, air temperature, temperature trend, Tatarsky Strait, Sea of Japan

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state budget theme of POI FEB RAS, registration No. 121021700346-7. The author expresses gratitude to the management and employees of the Primorsky Territorial Administration for Hydrometeorology and Natural Environment Control for the provided archival materials, and to the reviewer and editors of the Journal for their constructive remarks.

For citation: Gayko, L.A., 2022. Variability of Water and Air Temperature along the Coast of the Eastern Primorye and Khabarovsk Territory Based on the Weather Station Data. *Physical Oceanography*, 29(4), pp. 363-378. doi:10.22449/1573-160X-2022-4-363-378

Введение

Район исследования охватывает северо-западное побережье Японского моря и западное побережье Татарского пролива и расположен в умеренных широтах с муссонным характером атмосферной циркуляции¹. Существенное влияние на климат района оказывают холодное Приморское течение, ответвления теплого Цусимского течения и местная циркуляция вод^{2, 3} [1–3]. Всю рассматриваемую прибрежную зону с запада ограничивает Сихотэ-Алиньский хребет, имеющий высоту более 1000 м, который также играет важную роль в формировании термического режима всего побережья, в том числе рек, берущих начало в горах и впадающих в Японское море и Татарский пролив. В свою очередь реки являются нерестилищами одной из основных промысловых лососевых рыб – приморской горбуши [4, 5]. В современный период на фоне глобального изменения климата одной из важнейших задач климатологии является изучение региональных климатических изменений, в том числе и в прибрежных районах, которым придается большое как научное, так и практическое значение^{4, 5}. Актуальным является также нахождение наиболее уязвимых мест, влияющих на термический режим прибрежной зоны, путем анализа рядов инструментальных данных гидрометеорологических наблюдений, что позволит в дальнейшем прогнозировать развитие фоновых факторов и предлагать рекомендации при усилении их активности [6]. В настоящее время исследованию климатических изменений по регионам посвящено много работ [7–10]. Одним из показателей климатических изменений является изменение климатических норм, вычисленных за последовательные периоды времени. Климатическая норма – это средняя величина метеорологического элемента, статистически полученная из многолетнего ряда наблюдений за ним в данной местности [11]. Всемирной метеорологической организацией (ВМО) в качестве базового периода осреднения был рекомендован период в 30 лет (начиная с 1901–1930 гг.). В связи с происходящими климатическими изменениями ВМО приняла новый технический регламент оценки изменений климата: для поддержания долгосрочной оценки климата будет использоваться

¹ Климат Владивостока. Л. : Гидрометеиздат, 1983. 248 с.

² Юрасов Г. И., Яричин В. Г. Течения Японского моря. Владивосток : ДВО АН СССР, 1991. 172 с.

³ Лоция северо-западного берега Японского моря от реки Туманная до мыса Белкина. СПб. : ГУНИО МО РФ, 1996. 360 с.

⁴ Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom; N. Y., USA : Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

⁵ Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации : общее резюме. М. : Росгидромет, 2014. 60 с.

базовый исторический ряд (1961–1990 гг.), а для целей мониторинга климата и оценки оперативных изменений – новая оперативная норма (1981–2010 гг.) [11].

Выбор для исследования климатических изменений побережья Восточного Приморья и Хабаровского края обусловлен тем, что этот район имеет сложный рельеф местности, влияющий на атмосферную циркуляцию; прибрежные воды характеризуются сложной системой течений и различными гидрологическими параметрами бассейнов. Полученные результаты могут иметь также важное практическое значение, в том числе для изучения путей миграции приморской горбуши, так как изменение климатических условий приводит к перераспределению миграционных потоков горбуши вдоль побережья [4, 5]. Изучению изменчивости гидрологических условий рассматриваемых прибрежных районов автор посвятила более 20 лет, что отражено в статьях, материалах конференций ^{6, 7}, монографиях [5, 12–15]. Данное исследование является продолжением работы по ведению температурного мониторинга у российского побережья Японского моря и Татарского пролива и направлено на выявление закономерностей пространственного распределения и временных изменений характеристик термической структуры океана и атмосферы с учетом данных наблюдений на прибрежных станциях за последние годы.

Целью настоящей работы является исследование температурных особенностей прибрежных районов Восточного Приморья и Хабаровского края по многолетним данным наблюдений на гидрометеорологических станциях (ГМС) за 1950–2020 гг. Для этого были поставлены следующие задачи: выявить особенности внутригодового хода температуры; рассчитать для каждой станции базовую и оперативную температурные нормы для 30-летних периодов, рекомендованных ВМО; рассчитать аномалии температуры каждой среды по станциям относительно климатических норм и среднего многолетнего значения; выявить особенности многолетней динамики средней месячной и средней годовой температуры воды и воздуха в прибрежной зоне по данным ГМС; выявить и оценить климатические тренды во временном ходе температуры воды и воздуха; провести анализ изменчивости температуры по станциям относительно каждого нормального (30-летнего) ряда; выявить резкие изменения в многолетнем ходе температур за период наблюдений с помощью интегрально-разностных кривых аномалий годовых значений температур.

Материалы и методы

В настоящее время наблюдения гидрометеорологического режима рассматриваемого района проводятся всего на трех ГМС: Советская Гавань (СЗ Татарского пролива, Хабаровский край); Сосуново (ЮЗ Татарского пролива,

⁶ Гайко Л. А. Особенности температурного фона прибрежной зоны Приморского края по многолетним данным гидрометеорологических станций (северо-западная часть Японского моря) // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования: тезисы докладов всероссийской научной конференции. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. С. 174–175.

⁷ Гайко Л. А. Многолетняя изменчивость температуры воды и воздуха вдоль российского побережья Японского моря / 5-я Всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения Мирового океана», 30 сентября – 4 октября 2013 г., Владивосток, Россия : материалы конференции. Владивосток, 2013. С. 335–340.

Приморский край) и Рудная Пристань (СЗ Японского моря, Приморский край) (рис. 1). В работе использованы многолетние данные наблюдений температуры поверхностного слоя морской воды и температуры приземного воздуха, полученные на этих станциях за период 1950–2020 гг.

Среднемесячные данные наблюдений температуры были выбраны из фонда Приморского территориального управления по гидрометеорологии и контролю природной среды. По данным наблюдений для каждой станции были вычислены: базовая и оперативная климатические нормы по температуре для климатических периодов ВМО (III (1961–1990 гг.) и IV (1981–2010 гг.)) путем нахождения среднемесячных значений температуры воды и воздуха за соответствующие 30 лет; среднее многолетнее значение параметров за весь период исследования (1950–2020 гг.); среднегодовые значения элементов.

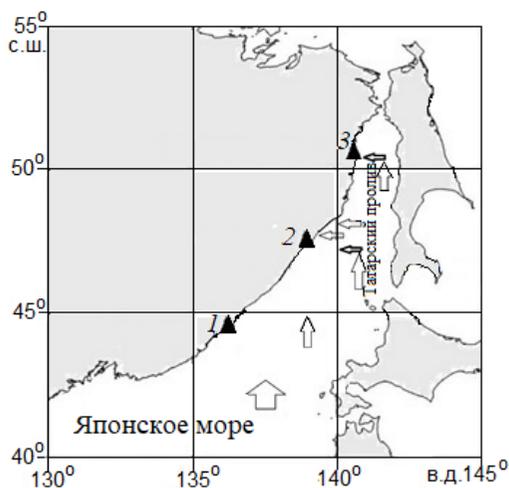


Рис. 1. Расположение ГМС: 1 – Рудная Пристань (ЮВ Приморья, север Японского моря); 2 – Сосуново (СВ Приморья, ЮЗ Татарского пролива); 3 – Советская Гавань (ЮВ Хабаровского края, СЗ Татарского пролива); схема генеральных направлений $\hat{\uparrow}$ анадромной миграции и районы массовых подходов \leftrightarrow горбуши в Японском море вдоль берегов Приморского и Хабаровского края в 2018 г. ⁸

Fig. 1. Location of coastal weather stations: 1 – Rudnaya Pristan (SE of Primorye, north of the Sea of Japan); 2 – Sosunovo (NE of Primorye, SW of the Tatarsky Strait); 3 – Sovetskaya Gavan (SE of the Khabarovsk territory, NW of the Tatarsky Strait); scheme of general directions $\hat{\uparrow}$ of anadromous migration of pink salmon and the areas of its mass approaches \leftrightarrow in the Sea of Japan along the coasts of the Primorsky and Khabarovsk territories in 2018 ⁸

Для выявления особенностей изменчивости температурного режима были рассчитаны отклонения температуры воды и воздуха от соответствующей климатической нормы, а также от среднего многолетнего значения. Для определения сдвигов в многолетнем ходе температуры были построены интегрально-разностные кривые аномалий от среднего многолетнего значения.

⁸ Назаров В. А., Лысенко А. В. Итоги лососевой путины 2018 г. в Приморском крае // Бюллетень № 13 реализации «Концепции Дальневосточной бассейновой программы изучения тихоокеанских лососей». Владивосток : ТИПРО-центр, 2018. С. 240–254.

Тенденции изменчивости температуры по станциям за 70-летний период, как принято при анализе длинных рядов наблюдений гидрометеорологических параметров, с целью сравнения с результатами в других регионах рассчитывались по стандартным методикам тренд-анализа по углу наклона линии регрессии; наличие линейного тренда определялось по величине коэффициента детерминации в зависимости от длительности ряда. При длительности ряда 70 лет тренд значим на 5%-ном уровне при $R^2 \geq 0,058$ ($p < 0,05$).

Результаты

Внутригодовая изменчивость температуры воды и воздуха на прибрежных ГМС. По результатам анализа многолетнего ряда данных наблюдений на ГМС для исследования внутригодовой изменчивости температуры были рассчитаны среднемесячные и среднегодовые значения температуры воды и воздуха для каждой станции за период 1950–2020 гг. (табл. 1). Так как район исследования расположен в умеренных широтах с муссонным характером атмосферной циркуляции, здесь хорошо выражены сезоны года. Минимальные значения температуры воды, по данным ГМС, наблюдаются в январе – феврале; воздуха – в январе, причем с превышением над соседними месяцами на 2–3°C; максимальные значения температуры воды и воздуха приходятся на август (табл. 1).

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Многолетняя средняя месячная и годовая температура воды и воздуха на прибрежных ГМС в 1950–2020 гг.

Multi-year average monthly and annual water and air temperature at the coastal weather stations in 1950–2020

ГМС / Station	Месяц / Month												Год / Year
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Температура воды, °C / Water temperature, °C													
РП / RP	-1,4	-1,3	-0,2	2,5	6,0	10,4	15,0	17,4	14,9	9,0	3,6	-0,3	6,3
С / S	-1,5	-1,6	-1,0	1,0	3,9	7,7	12,1	15,0	13,6	8,7	4,0	0,1	5,2
СГ / SG	-1,1	-0,8	-0,6	0,2	4,9	9,7	13,2	15,4	13,5	8,5	2,5	-1,1	5,3
Температура воздуха, °C / Air temperature, °C													
РП / RP	-11,1	-8,2	-2,1	3,8	8,0	11,6	16,2	18,6	14,7	7,5	-1,4	-8,9	4,1
С / S	-12,8	-10,4	-4,2	1,8	6,2	9,8	14,5	16,8	13,3	6,2	-3,1	-10,6	2,3
СГ / SG	-16,0	-13,6	-6,7	1,5	7,1	11,8	15,6	17,4	13,5	6,1	-4,2	-12,7	1,6

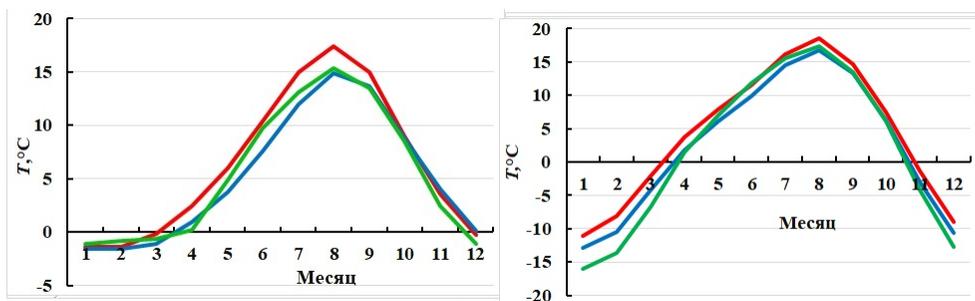
П р и м е ч а н и е. РП – Рудная Пристань; С – Сосуново; СГ – Советская Гавань (здесь и в табл. 2–4).

N o t e: RP – Rudnaya Pristan; S – Sosunovo; SG – Sovetskaya Gavan (here and in tables 2–4).

Отрицательная температура воздуха наблюдается на станциях в течение 5 месяцев (ноябрь – март), температура воды – в течение 4 месяцев (декабрь – март), за исключением ГМС Сосуново, где для температуры воды этот период составляет всего три месяца (январь – март) (табл. 1).

При анализе распределения температуры воды по месяцам выяснилось, что на станции, находящейся севернее, температура может быть выше, чем на станции, расположенной южнее, т. е. нарушается естественное распределение температуры, свойственное данной широте места расположения станции. Так, в январе – марте и в мае – августе на ГМС Сосуново температура воды ниже, чем на соседних станциях, в ноябре – декабре выше, и только в апреле, сентябре и октябре температура распределяется в соответствии с широтой места расположения станции. Также на самой южной ГМС – Рудная Пристань в январе – феврале температура воды ниже, чем на северной ГМС – Советская Гавань. В годовом ходе температуры воздуха на ГМС Сосуново, в отличие от температуры воды, зональность нарушена только в мае – сентябре, т. е. температура в эти месяцы ниже, чем на соседних станциях (табл. 1). Возможно, что на такое распределение температур оказывают влияние особенности местной циркуляции вод и орография местности [1–3]. Средняя годовая амплитуда температуры воды на станциях с севера на юг составила 16,5, 16,6 и 18,8°C, температуры воздуха 33,4, 29,6 и 29,7°C соответственно. Сравнение среднегодовых значений температуры по станциям за весь период наблюдений показало, что в годовом аспекте различия в температуре воды не превышают 1,0°C, в температуре воздуха 2,5°C (табл. 1).

На рис. 2 приведен годовой ход температуры воды и воздуха на станциях. Анализ графиков показывает, что рост температуры воды, т. е. ее нагрев, происходит в январе – августе и идет медленнее и с большим разбросом значений температуры, чем ее понижение, т. е. охлаждение, с августа по декабрь. Кроме того, восходящая ветвь на ГМС Сосуново проходит ниже ветви на ГМС Советская Гавань, за исключением апреля и декабря, хотя станция расположена южнее. Ход кривой распределения температуры воды на ГМС Советская Гавань, расположенной в более мелководной части Татарского пролива, несколько отличается от хода на других станциях, здесь наблюдается более поздний весной и ранний зимой переход температуры воды через 0°C. Ход кривых температуры воздуха более однороден, чем ход кривых температуры воды, особенно в теплый период. В холодный период температура воздуха ниже на ГМС Советская Гавань, а в первой половине теплого периода – на ГМС Сосуново.



Р и с. 2. Годовой ход температуры воды (слева) и воздуха (справа) на ГМС Рудная Пристань (красная кривая), Сосуново (синяя кривая), Советская Гавань (зеленая кривая)

F i g. 2. Annual variation of the water (left) and air (right) temperature at the stations Rudnaya Pristan (red curve), Sosunovo (blue curve) and Sovetskaya Gavan (green curve)

Распределение аномалий средней температуры воды и воздуха на прибрежных ГМС. Для выявления особенностей внутригодовой изменчивости температуры воды и воздуха на ГМС за период 1950–2020 гг. были рассчитаны аномалии средних месячных и средних годовых температур по каждой станции для каждой среды от базовой (1961–1990 гг.) и оперативной (1981–2010 гг.) климатических норм (табл. 2). При анализе аномалий средней месячной температуры воды от базовой (III) нормы практически на всех станциях выявлены положительные аномалии во все месяцы года с максимумом на ГМС Сосуново в июле (1,0°C). Небольшие отрицательные аномалии отмечены только на ГМС Сосуново и Рудная Пристань в ноябре – декабре, а также на ГМС Рудная Пристань в марте. Аномалии средней месячной температуры воздуха практически на всех станциях также положительные, за исключением ГМС Советская Гавань и Сосуново, где они имеют отрицательное значение (в апреле и декабре соответственно). Суммарные отклонения за год для температуры воды и воздуха тоже положительные.

Т а б л и ц а 2
Table 2

Отклонения от климатической нормы средних месячных и годовых температур воды и воздуха на прибрежных ГМС в 1950–2020 гг.
Deviations of the average monthly and annual water and air temperature from the climatic normal at the coastal weather stations in 1950–2020

ГМС / Station	Норма / Normal	Месяц / Month												Год / Year
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Аномалии температуры воды, °C / Water temperature anomalies, °C														
РП / RP	III	0,0	0,1	-0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	-0,1	-0,1	0,2
С / S		0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,6	1,0	0,7	0,5	0,2	-0,1	-0,1	0,3
СГ / SG		0,1	0,1	0,2	0,1	0,4	0,6	0,6	0,3	0,7	0,4	0,2	0,0	0,3
РП / RP	IV	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,6	-0,1	0,2	0,0	-0,1
С / S		-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,4	-0,7	-0,7	-0,4	-0,6	0,0	0,4	0,1	-0,1
СГ / SG		-0,5	0,2	0,0	0,0	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1	-0,4	-0,2	0,0	0,0	-0,1
РП / RP	ΔT	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,3	-0,6	-0,8	-0,9	-1,0	-0,6	0,3	0,1	-0,3
С / S		-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,8	-1,3	-1,7	-1,1	-1,1	-0,2	0,5	0,2	-0,4
СГ / SG		-0,6	0,1	-0,2	-0,1	-0,6	-0,9	-0,7	-0,4	-1,1	-0,6	-0,2	0,0	-0,4
Аномалии температуры воздуха, °C / Air temperature anomalies, °C														
РП / RP	III	0,3	0,5	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,0	0,0	0,3
С / S		0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	0,4	0,6	0,6	0,6	0,4	0,1	-0,2	0,3
СГ / SG		0,3	0,4	0,1	-0,2	0,0	0,1	0,4	0,2	0,5	0,3	0,1	0,1	0,2
РП / RP	IV	-0,4	-0,6	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3	-0,2	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,4	-0,4
С / S		-0,3	-0,2	-0,1	-0,2	-0,4	-0,5	-0,3	-0,3	-0,2	0,0	-0,1	-0,2	-0,3
СГ / SG		-0,8	-0,3	-0,4	-0,2	-0,2	-0,5	-0,2	-0,5	-0,2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,4
РП / RP	ΔT	-0,7	-1,1	-0,6	-0,5	-0,5	-0,7	-0,6	-0,9	-0,7	-0,6	-0,1	-0,4	-0,7
С / S		-0,4	-0,5	-0,3	-0,4	-0,5	-0,9	-0,9	-0,9	-0,8	-0,4	-0,2	0,0	-0,6
СГ / SG		-1,1	-0,7	-0,5	0,0	-0,2	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,5	-0,4	-0,6

П р и м е ч а н и е. Климатическая норма III рассчитана за период 1961–1990 гг., IV – за период 1981–2010 гг.; ΔT – разность (IV–III).

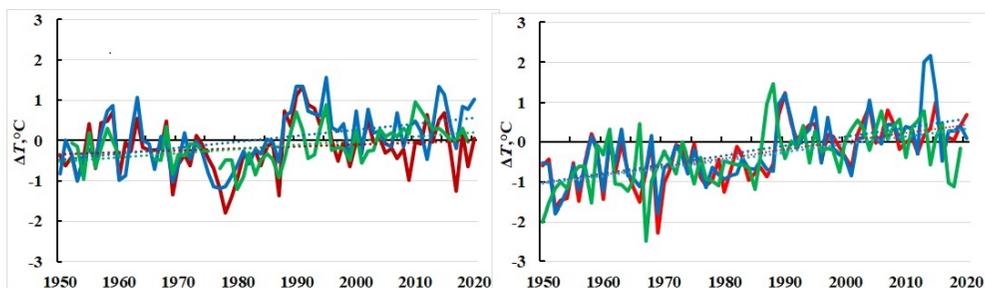
N o t e: Climatic normal III is calculated for 1961–1990, that of IV – for 1981–2010; ΔT is difference (IV– III).

Анализ распределения аномалий средней температуры воды от оперативной нормы (IV) по месяцам показал совсем другую картину. На всех станциях только в ноябре – декабре, а также на ГМС Советская Гавань в феврале – апреле и Сосуново – в октябре температура воды была около или немного выше нормы. В остальные месяцы наблюдались только отрицательные аномалии с минимумами: на ГМС Советская Гавань – в январе ($-0,5^{\circ}\text{C}$), Сосуново – в июне – июле ($-0,7^{\circ}\text{C}$), Рудная Пристань – в сентябре ($-0,6^{\circ}\text{C}$). Суммарные отклонения за год на всех станциях отрицательные (по $-0,1^{\circ}\text{C}$).

Отклонения среднемесячных температур воздуха от оперативной нормы за рассматриваемый период на всех станциях также были отрицательными во все месяцы, за исключением ГМС Сосуново (октябрь), где значения оставались в пределах нормы. Минимумы по станциям распределились следующим образом: на ГМС Советская Гавань – в январе ($-0,8^{\circ}\text{C}$), Сосуново – в июне ($-0,5^{\circ}\text{C}$), Рудная Пристань – в феврале ($-0,6^{\circ}\text{C}$). Кумулятивные среднегодовые аномалии были также отрицательными.

Таким образом, в 1950–2020 гг. на указанных станциях температура воды и воздуха в основном была ниже оперативной нормы (1981–2010 гг.), но выше базовой (1961–1990 гг.). Это свидетельствует о том, что оперативная норма стала существенно выше базовой. Результаты подтверждают показатели увеличения норм, т. е. потепление, на большей части южной половины России в последние десятилетия [11].

Межгодовая изменчивость температуры воды и воздуха в 1950–2020 гг. Для ее исследования были построены графики отклонений среднегодовых значений температуры воды и воздуха от среднего многолетнего. На рис. 3 (слева) показан межгодовой ход аномалий температуры воды, который имеет волнообразный вид с двумя неравнозначными гребнями и ложбиной между ними. Первая волна (от $-0,9^{\circ}\text{C}$ на ГМС Сосуново в 1950 г. до максимума $1,0^{\circ}\text{C}$ там же в 1963 г.) характеризуется относительной синхронностью хода на всех станциях. Затем идет снижение температуры воды на всех станциях, с сохранением синхронности, до минимума на ГМС Рудная Пристань в 1978 г., ($-1,6^{\circ}\text{C}$), далее продолжают ее незначительные колебания до 1987 г. В этот год произошло снижение температуры сразу на всех станциях с минимумом также на ГМС Рудная Пристань ($-1,2^{\circ}\text{C}$), после чего температура стала резко повышаться, и с 1988 по 1995 г. на всех станциях были отмечены только положительные аномалии. Исключение составила ГМС Советская Гавань, где в 1992–1993 гг. наблюдалось незначительное снижение температуры ($-0,3^{\circ}\text{C}$). После 1998 г. ход аномалий температуры воды приобрел пилообразный вид с нарушением синхронности, что характерно для региона со сложным гидрологическим режимом. Максимальные положительные аномалии температуры воды на этом участке отмечены на ГМС Сосуново в 2020 г. ($1,4^{\circ}\text{C}$), отрицательные – на ГМС Рудная Пристань в 2017 г. ($-1,1^{\circ}\text{C}$). Положительный температурный тренд в ходе температуры воды, значимый на 5%-ном уровне, выявлен на ГМС Советская Гавань и Сосуново, хотя и на ГМС Рудная Пристань линия регрессии имеет положительный наклон (табл. 3).



Р и с. 3. Межгодовая изменчивость аномалий (ΔT) среднегодовой температуры воды (слева) и воздуха (справа) и их линейные тренды на ГМС Рудная Пристань (красная кривая), Сосуново (синяя кривая), Советская Гавань (зеленая кривая) в 1950–2020 гг.

Fig. 3. Interannual variability of the annual average water (left) and air (right) temperature anomalies (ΔT) and their linear trends at stations Rudnaya Pristan (red curve), Sosunovo (blue curve) and Sovetskaya Gavan (green curve) in 1950–2020

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Коэффициенты полинома первой степени (A , B), аппроксимирующего трендовую составляющую температуры воды и воздуха, и коэффициент детерминации (R^2)
Coefficients of the polynomial of the first degree (A , B) approximating the trend component of water and air temperature, and the determination coefficient (R^2)

ГМС / Station	Температура воды, °C / Water temperature, °C			Температура воздуха, °C / Air temperature, °C		
	A	B	R^2	A	B	R^2
РП / RP	0,0047	-0,1770	0,0238	0,0210	-0,7893	0,3845
С / S	0,0156	-0,4973	0,2171	0,0239	-0,8712	0,3974
СГ / SG	0,0112	-0,4548	0,2361	0,0219	-0,8151	0,3781

П р и м е ч а н и е. Жирным шрифтом выделены коэффициенты, значимые на 5%-ном уровне.
N o t e: The coefficients significant at the 5% level are in bold.

Межгодовой ход аномалий температуры воздуха за 1950–2020 гг. показан на рис. 3 (справа). В распределении температуры воздуха прослеживается бóльшая однородность, чем в распределении температуры воды, но здесь сказывается также влияние широты местоположения станции. Первая половина графика до конца 80-х гг. характеризуется в основном отрицательными аномалиями с минимумом в 1969 г. на ГМС Рудная Пристань ($-2,3^{\circ}\text{C}$); после 1987 г. наблюдались только положительные аномалии с максимумом на ГМС Сосуново в 2014 г. ($2,2^{\circ}\text{C}$). На всех трех станциях в ходе температуры воздуха за рассматриваемый период был выявлен значимый на 5%-ном уровне положительный тренд (табл. 3). В работе [16] также отмечено, что для участка побережья Японского моря от Корейского п-ова до о. Хоккайдо характерны вековые положительные тренды температуры воздуха (значимостью 5% и менее), что соответствует и нашим выводам.

Таким образом, не вызывает сомнений, что в 1950–2020 гг. на побережье Восточного Приморья и Хабаровского края происходит повышение темпера-

туры воды и воздуха, ее динамика характеризуется устойчивым положительным статистически значимым линейным трендом. Следует отметить, что такая же ситуация в Дальневосточном регионе наблюдается и на п-ове Камчатка, где тип климата прибрежных районов также характеризуется как муссонный с морскими чертами. В ходе средней годовой температуры воздуха на полуострове за аналогичный период также выявлен положительный статистически значимый линейный тренд [10].

Рост температуры воды и воздуха, по данным прибрежных станций за исследуемый период, отмечен не только в среднегодовых значениях, но и по сезонам, только с различной скоростью. Величина прироста температуры по десятилетиям приведена в табл. 4. Тенденция повышения межгодовой температуры воды на ГМС Советская Гавань и Сосуново составила 0,11 и 0,16°C / 10 лет соответственно, воздуха – на всех ГМС в среднем 0,20°C / 10 лет.

При рассмотрении изменчивости температуры по сезонам выявлено, что наибольший рост температуры воды происходит в теплый период на ГМС Советская Гавань и Сосуново (0,22 и 0,24°C / 10 лет соответственно), в холодный сезон температура практически не меняется. В отличие от температуры воды наибольший рост температуры воздуха, превышающий 0,20°C / 10 лет, происходит в холодный период с максимумом на ГМС Советская Гавань (0,31°C / 10 лет), за исключением ГМС Сосуново, где повышение идет практически равномерно в оба сезона. Таким образом, можно отметить, что в целом наибольшее повышение температуры воды на станциях происходит в теплый сезон, температуры воздуха – в холодный.

Т а б л и ц а 4
T a b l e 4

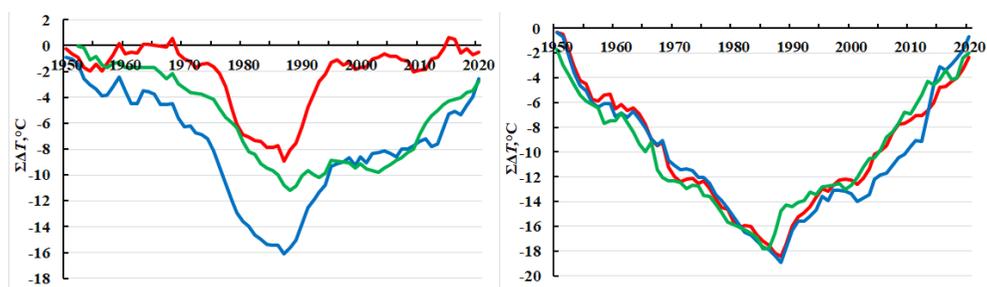
Приращение среднегодовой и сезонной температуры воды (ΔT_w) и воздуха (ΔT_a) (°C / 10 лет) на прибрежных ГМС
Increment of average annual and seasonal water (ΔT_w) and air (ΔT_a) temperature (°C / 10 years) at the coastal weather stations

ГМС / Station	Период / Period	ΔT_w , °C / 10 лет / ΔT_w , °C / 10 years	ΔT_a , °C / 10 лет / ΔT_a , °C / 10 years
РП / RP	Сезон / Season	<u>0,05</u> 0,04	<u>0,19</u> 0,24
	Год / Year	0,05	0,21
С / S	Сезон / Season	<u>0,24</u> 0,02	<u>0,25</u> 0,23
	Год / Year	0,16	0,23
СГ / SG	Сезон / Season	<u>0,22</u> -0,01	<u>0,13</u> 0,31
	Год / Year	0,11	0,22

П р и м е ч а н и е. В числителе – коэффициенты для теплого полугодия (апрель – декабрь), в знаменателе – для холодного (ноябрь, декабрь, январь – март).

N o t e: In the numerator, there are the coefficients for a warm half-year (April – December), in the denominator – for a cold one (November, December, January – March).

Сдвиги (резкие изменения) в многолетнем ходе температуры. Для определения резких изменений, так называемых сдвигов в многолетнем ходе температуры, были построены интегрально-разностные кривые аномалий средних температур (рис. 4). При последовательном осреднении аномалий с помощью интегральных разностей хорошо проявляются общие закономерности временных изменений характеристик термической структуры, а по характеру смены направления хода интегрально-разностной кривой определяются изменения в ходе температурных кривых⁹. Интегральные кривые температуры воды, построенные для трех станций (рис. 4, слева), имеют довольно сложный ход, но в общих чертах синхронность прослеживается. В 50–60-х гг. наблюдается или медленное понижение температуры воды, или колебание около среднего многолетнего, переходящее затем в длительную ветвь накопления отрицательных аномалий вплоть до перегиба в 1987–1988 гг., после которого до 1995 г. идет резкий подъем интегральной кривой, а затем до 2001 г. – или варьирование температуры около среднего многолетнего, или ее неравномерный рост уже вплоть до 2020 г. Но на каждой станции в ходе кривых интегральных разностей амплитуды температуры воды наблюдаются свои особенности.



Р и с. 4. Межгодовая изменчивость накопленных аномалий ($\Sigma\Delta T$) температуры воды (слева) и воздуха (справа) от среднего многолетнего значения (1950–2020 гг.) на ГМС Рудная Пристань (красная кривая), Сосуново (синяя кривая), Советская Гавань (зеленая кривая)

Fig. 4. Interannual variability of the cumulative anomalies ($\Sigma\Delta T$) of water (left) and air (right) temperature against the average multi-year values (1950–2020) at the stations Rudnaya Pristan (red curve), Sosunovo (blue curve) and Sovetskaya Gavan (green curve)

На ГМС Рудная Пристань (рис. 4, слева) в 1950–1974 гг. температура воды изменяется в пределах среднего значения с частой сменой знака аномалий; затем в 1974–1981 гг. происходит резкий переход на длительную тенденцию снижения температуры воды, далее снижение замедляется и (через «ступеньку» в 1986 г.) в 1987 г. происходит перегиб кривой на рост, и до 1995–1996 гг. идет быстрое накопление положительных аномалий; затем в 1996–2020 гг. температура вновь изменяется в пределах среднего значения, при этом 5 раз знаки аномалий меняются на противоположные, и в 2015–2016 гг. на этом отрезке достигается максимум. На ГМС Сосуново, расположенной южнее ГМС Совет-

⁹ Чернышева Л. С., Платонова В. А. Расчет и интерпретация основных климатических показателей отдельных метеорологических величин. Владивосток : Изд-во Дальневосточного университета, 2009. 88 с.

ская Гавань, отмечается значительно большее накопление отрицательных аномалий, чем на других станциях. В 1950–1974 гг. происходит ступенчатое замедленное снижение температуры воды с попеременной сменой знака аномалий; в 1974–1984 гг. снижение резко ускоряется и «ступеньками» переходит к минимуму в 1987 г., после чего интегральная кривая аномалий меняет свое направление на рост и начинается неравномерное накопление положительных аномалий: резкое до 1995 г., замедляющееся к 2013 г. и затем вновь резко увеличивающееся вплоть до 2020 г., но с единичным понижением температуры в 2017 г. На ГМС Советская Гавань до 1975 г. также сначала происходит плавное понижение температуры, затем скорость снижения увеличивается вплоть до перегиба кривой в 1988 г., после чего, как и на других станциях, наблюдается резкий рост температуры воды до 1995 г., переходящий в незначительное снижение к 2003 г.; затем до 2020 г. вновь продолжается стабильное накопление положительных аномалий.

Кривые интегральных разностей аномалий температуры воздуха, в отличие от температуры воды, демонстрируют синхронность для всех трех станций (рис. 4, справа). С помощью интегральных разностей на станциях была выявлена длительная тенденция снижения температуры примерно с 1950 г. до перегиба в ходе кривой в 1986–1988 гг., затем – тенденция роста до 2020 г. При этом на ветви отрицательных разностей можно выделить несколько коротких периодов накопления положительных аномалий: в 1956–1959 гг. и в 1968 г. на ГМС Рудная Пристань и Сосуново, в 1958–1961 гг. и в 1966 г. – на ГМС Советская Гавань, а также периоды колебания температуры в пределах среднего многолетнего значения в 1971–1975 гг. – на ГМС Рудная Пристань и в 1969–1974 гг. – на ГМС Советская Гавань. На всех станциях после перегиба в 1986–1988 гг. до 1995 г. идет довольно крутой подъем разностной кривой, затем до 2001 г. на ГМС Рудная Пристань и Советская Гавань происходит колебание температуры воздуха в пределах среднего многолетнего значения, а на ГМС Сосуново – даже небольшое снижение температуры. После 2001 г. на всех станциях ветви разностных кривых вновь идут на подъем вплоть до 2020 г., но с небольшими понижениями температуры воздуха в 2014 и 2017–2018 гг. на ГМС Советская Гавань и в 2016 г. – на ГМС Сосуново.

Кроме того, детальный анализ графиков межгодовой изменчивости кумулятивных аномалий температуры воды и воздуха (рис. 4) показал, что на всех станциях после перегиба кривой аномалий температуры в 1987–1988 гг. с падения на рост произошел ее резкий подъем к 1995 г., после которого рост температуры к 2001 г. приостановился. Следует отметить, что именно 1995 г. был важной вехой для условий размножения приморской горбуши – в ее нерестовом ареале произошла смена доминирующих поколений с нечетных лет на четные [4, 5] спустя 7–8 лет после перехода температуры с падения на рост. Таким образом, возможно, смене доминирующих поколений горбуши предшествовали резкие изменения в многолетнем ходе температуры в регионе.

Если проанализировать все 6 кривых интегральных разностей на рис. 4, можно отметить, что на ГМС Рудная Пристань, расположенной на северо-западном побережье Японского моря, суммы отрицательных и положительных аномалий температуры воды к 2020 г. уравниваются, а на ГМС Сосуново

и Советская Гавань, расположенных на западном побережье Татарского пролива, в рассматриваемый период преобладает накопление отрицательных аномалий. Возможно, такое распределение аномалий температуры воды связано с различными гидрологическими условиями бассейнов Японского моря и Татарского пролива, а также с особенностями местной циркуляции вод. В ходе кривых интегральных разностей температуры воздуха таких различий не наблюдается, суммы отрицательных и положительных аномалий температуры к 2020 г. уравниваются.

Интегрально-разностные кривые аномалий позволили выявить в исследуемом районе примерно с 1950 г. длительную тенденцию понижения температуры воды и воздуха, переходящую после перегиба интегральной кривой в 1986–1988 гг. на тенденцию роста вплоть до 2020 г. Такой ход интегральных разностей аномалий температуры в регионе соответствует общим тенденциям хода среднегодовой температуры воздуха в западном субарктическом регионе Тихого океана [17], в том числе и вдоль побережья п-ова Камчатка [10]. В то же время стои́т отметить, что переход в ходе температуры от падения к росту вдоль побережья Восточного Приморья и юго-востока Хабаровского края, а также вдоль берега п-ова Камчатка начался с конца 80-х гг., а в европейской части России он произошел с конца 70-х гг., т. е. на 10 лет раньше [9, 10]. Противоречия здесь нет, так как потепление на планете происходит волнообразно. Результаты проведенных исследований находят свое подтверждение в выводах климатологов, занимающихся исследованием состояния земной климатической системы. Ими было выделено несколько волн глобального потепления, в том числе период 1975–1995 гг. – начало «второй волны потепления» и период 1996–2010 гг. – развитие «второй волны потепления» [8].

Заключение

По результатам исследования изменчивости температурного режима прибрежных районов Восточного Приморья и Хабаровского края на основании данных ГМС за период 1950–2020 гг. в многолетнем ходе средней температуры воды и воздуха выявлен значимый на 5%-ном уровне положительный линейный тренд: в ходе температуры воды – на ГМС Советская Гавань и Сосуново, температуры воздуха – на всех станциях. Хотя в распределении температуры воды на ГМС Рудная Пристань тренд не выявлен, линия регрессии имеет положительный наклон, т. е. тенденция повышения температуры прослеживается.

Прирост температуры по десятилетиям показал, что в межгодовом ходе отмечена тенденция роста температуры воды на ГМС Советская Гавань и Сосуново на 0,11 и 0,16°C / 10 лет соответственно, температуры воздуха – на всех станциях в среднем на 0,20°C / 10 лет. При рассмотрении изменчивости температуры по сезонам выявлено, что, за исключением ГМС Рудная Пристань, основное повышение температуры воды происходит в теплый сезон с максимумом на ГМС Сосуново (0,24°C / 10 лет), температуры воздуха – в холодный сезон с максимумом на ГМС Советская Гавань (0,31°C / 10 лет). На ГМС Рудная Пристань температура воды меняется незначительно.

Анализ распределения аномалий средней температуры воды и воздуха от оперативной и базовой климатических норм по месяцам показал, что в 1950–

2020 г. на станциях температуры воды и воздуха в основном были ниже оперативной нормы (1981–2010 г.), но выше базовой (1961–1990 г.). Это подтверждает, что оперативная норма стала существенно выше базовой, и свидетельствует о повышении температуры в регионе, но оперативную норму рекомендуется применять для решения оперативных задач, а для оценки изменения климата рекомендуется продолжать применять базовую.

С помощью интегрально-разностных кривых аномалий средних температур было выявлено, что в 50–60-х гг. прошлого века в ходе температуры воды наблюдалось или ее медленное понижение, или колебание в пределах среднего многолетнего значения, перешедшее затем в длительный период накопления отрицательных аномалий вплоть до 1987–1988 гг. В эти годы произошел перегиб кривой на накопление положительных аномалий, которое проходило также неравномерно: сначала резкий подъем температуры до 1995 г., затем ее некоторое «стояние» до 2001 г. и вновь рост до 2020 г. Следует также отметить, что в данном регионе именно с 1995 г. выявлен тренд на увеличение численности возврата рыб четных лет после смены доминирующих поколений приморской горбуши с нечетных лет на четные. Возможно, это связано с выявленной в исследуемом прибрежном районе общей тенденцией повышения температуры с конца 80-х гг.

Сравнение сумм отрицательных и положительных аномалий температур воды за период исследования показало, что на ГМС Рудная Пристань (ЮЗ Японского моря) к 2020 г. эти суммы уравниваются, а на ГМС Сосуново и Советская Гавань (запад Татарского пролива) преобладает сумма отрицательных аномалий, что связано, возможно, с различными гидрологическими условиями бассейнов моря и пролива и особенностями местной циркуляции вод. Суммы отрицательных и положительных аномалий температур воздуха, в отличие от температуры воды, уравниваются на всех станциях.

Таким образом, в исследуемый период на побережье Восточного Приморья и Хабаровского края с 50-х гг. прошлого века преобладали в основном отрицательные аномалии температуры воды и воздуха, а с конца 80-х гг. вплоть до 2020 г. стали доминировать положительные аномалии. В целом повышение температуры воды и воздуха не вызывает сомнений, так как ее динамика характеризуется устойчивым статистически значимым линейным трендом и повышением климатических норм, т. е. в данном регионе в 1950–2020 гг. прослеживается тенденция повышения температуры вдоль всего побережья.

В дальнейшем планируется более детальное исследование особенностей температурного режима российского побережья Японского моря и Татарского пролива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Покудов В. В., Власов Н. А.* Температурный режим прибрежных вод Приморья и острова Сахалин по данным ГМС // Труды ДВНИГМИ. 1980. Вып. 86. С. 109–118.
2. *Danchenkov M. A., Aubrey D. G.* Scheme of surface water circulation of the northern Japan Sea // Annual Report. PICES 8th Annual Meeting, October 8–17. Vladivostok, Russia. 1999. P. 130–132.
3. *Андреев А. Г.* Особенности циркуляции вод в южной части Татарского пролива // Исследование Земли из космоса. 2018. № 1. С. 3–11. doi:10.7868/S0205961418010013

4. Климатические причины снижения запасов амурских лососей в 20-м столетии / А. А. Гояринов [и др.] // Дальневосточный регион – рыбное хозяйство. 2007. № 1–2. С. 94–113.
5. *Лысенко А. В., Шатилина Т. А., Гайко Л. А.* Влияние гидрометеорологических условий на динамику вылова (численности) приморской горбуши *Oncorhynchus Gorbuscha (Salmonidae)* на основе ретроспективных данных (Японское море, Татарский пролив) // Вопросы ихтиологии. 2021. Т. 61, № 2. С. 206–218. doi:10.31857/S0042875221020156
6. *Метревели Г. С., Метревели М. Г.* Фоновые факторы глобального потепления климата в прибрежной зоне Черного моря // Водные ресурсы. 2001. Т. 28, № 5. С. 621–627.
7. Современные изменения климата на территории Иркутской области / И. В. Латышева [и др.] // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2010. Т. 3, № 2. С. 110–125.
8. *Морозова С. В., Левицкая Н. Г., Орлова И. А.* Климатические изменения в Нижневолжском регионе на фоне глобального потепления (на примере Саратова) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2013. Т. 13, № 1. С. 45–50.
9. *Переведенцев Ю. П., Шанталинский К. М., Важнова Н. А.* Пространственно-временные изменения основных показателей температурно-влажностного режима в Приволжском федеральном округе // Метеорология и гидрология. 2014. № 4. С. 32–48.
10. *Шкаберда О. А., Василевская Л. Н.* Оценка изменений температуры воздуха на Камчатке за последние 60 лет // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2013. № 3. С. 69–77.
11. *Коршунова Н. Н., Швець Н. В.* Изменение норм основных климатических параметров на территории России за последние десятилетия // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. 2014. № 178. С. 11–24.
12. *Гайко Л. А.* Тенденция изменчивости температуры воды и воздуха в прибрежных районах северо-западной части Японского моря // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2007. Т. 2. С. 473–477.
13. *Гайко Л. А.* Изменение климата в прибрежной зоне Приморского края в современный период (северо-западная часть Японского моря) // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. 2016. № 10. С. 35–42.
14. *Гайко Л. А.* Температурные изменения воды и воздуха вдоль побережья Приморского края в современный период (северо-западная часть Японского моря) // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2019. № 2. С. 29–37. doi:10.34078/1814-0998-2019-58-2-29-37
15. *Gayko L. A.* Water and air temperature variability along the coast of Primorye (Japan/East Sea) // Current Development in Oceanography. 2012. Vol. 5, iss. 2. P. 49–58.
16. Климатические изменения в Японском море и прилегающих районах в 20-м столетии / В. И. Пономарев [и др.] // Известия Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра. 2000. Т. 127-1. С. 20–36.
17. *Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И.* Климатические изменения термических условий в тихоокеанской субарктике в условиях современного глобального потепления // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С. 162–178. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-162-178

Об авторе:

Гайко Лариса Афанасьевна, старший научный сотрудник, ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат географических наук, доцент, **WOS ResearchID: AAG-2087-2021**, **Scopus Author ID: 9132796300**, **ORCID ID: 0000-0002-6666-0576**, **AuthorID: 70781**, gayko@yandex.ru

Численное моделирование проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту

В. В. Фомин, А. Ю. Белоконь , Л. В. Харитоновна, Д. В. Алексеев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 *aleksa.44.33@gmail.com*

Поступила в редакцию 31.03.2022; одобрена после рецензирования 18.04.2022;
принята к публикации 04.05.2022.

Цель. На основе результатов численного моделирования исследовать процесс проникновения волн цунами из гипотетических очагов землетрясений в Балаклавскую бухту и провести цунамирайонирование береговой полосы бухты – цель данной работы.

Методы и результаты. Представлены результаты численного моделирования проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту с последующим затоплением побережья. С помощью нелинейной модели длинных волн решалась задача об эволюции волн цунами в Черном море из трех гипотетических очагов землетрясений. Получены зависимости от времени колебаний уровня моря на входе в Балаклавскую бухту, они использовались в качестве краевых условий на жидкой границе расчетной области, для которой с помощью модели *SWASH* выполнялось численное моделирование распространения волн цунами в бухте с последующим накатом на берег.

Выводы. При распространении волн цунами в Балаклавской бухте формируются сейшевые колебания уровня моря с периодом ~ 8 мин, соответствующие моде Гельмгольца. Внутри бухты высоты цунами увеличиваются в 5–6 раз по сравнению с входом в расчетную область. Колебания уровня моря максимальны в вершине бухты, где его подъем достигает 1,4–1,5 м. Наибольшему затоплению подвержены восточные берега Балаклавской бухты и берега, примыкающие к ее вершине. Значения на суше уровня воды, отсчитываемого от уровня грунта, достигают 1,0–1,5 м, в вершине бухты 1,8 м. Максимальная протяженность горизонтального заплеска для восточного берега составляет 60 м, в вершине бухты 90 м.

Ключевые слова: численное моделирование, цунами, цунамирайонирование, *SWASH*, Балаклавская бухта

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005.

Для цитирования: Численное моделирование проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту / В. В. Фомин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 4. С. 405–421. doi:10.22449/0233-7584-2022-4-405-421

Numerical Simulation of Tsunami Wave Propagation to the Balaklava Bay

V. V. Fomin, A. Yu. Belokon [✉], L. V. Kharitonova, D. V. Alekseev

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
[✉] aleksa.44.33@gmail.com

Abstract

Purpose. To investigate the process of tsunami wave propagation from the hypothetical earthquake foci to the Balaklava Bay, and to zone the tsunami impact upon the bay coastline based on the results of numerical modeling, are the purposes of the paper.

Methods and Results. The results of numerical simulation of the tsunami wave propagation to the Balaklava Bay with subsequent flooding of the coast are presented. The problem of the tsunami wave propagation from three hypothetical earthquake foci and their evolution in the Black Sea was solved using the nonlinear model of long waves. Time dependences of the sea level fluctuations at the entrance to the Balaklava Bay were obtained. They were applied as boundary conditions at the liquid boundary of the computational domain, where the *SWASH* model had been used to simulate numerically the tsunami wave propagation in the bay with their subsequent run-up to the coast.

Conclusions. Propagation of tsunami waves in the Balaklava Bay is accompanied by formation of the sea level seiche oscillations with a period ~ 8 min which correspond to the Helmholtz mode. Inside the bay, the tsunami heights increase by 5–6 times as compared to those at the entrance to the computational domain. The sea level fluctuations are maximal at the bay top, where its rise achieves 1.4–1.5 m. The eastern coast of the Balaklava Bay and the one adjacent to its top are subject to the strongest flooding. The values of water level on land measured from the ground level, reach 1.0–1.5 m, and at the bay top – 1.8 m. At the eastern coast of the bay, the flooding maximum length constitutes 60 m, at its top – 90 m.

Keywords: numerical simulation, tsunami, tsunami zoning, *SWASH*, Balaklava Bay

Acknowledgment: the investigation was carried out within the framework of the state assignment on theme No. 0555-2021-0005.

For citation: Fomin, V.V., Belokon, A.Yu, Kharitonova, L.V. and Alekseev, D.V., 2022. Numerical Simulation of Tsunami Wave Propagation to the Balaklava Bay. *Physical Oceanography*, 29(4), pp. 379-394. doi:10.22449/1573-160X-2022-4-379-394

Введение. Цунами в Черном море – редкое, но не безопасное для побережья данного региона явление. За последние 3000 лет здесь произошло 50 событий, которые вызвали цунами [1]. Подавляющее большинство этих событий имели сейсмическую природу, а некоторые, вероятно, оползневую или метеорологическую. Не исключено, что они могут произойти и в будущем. Сведений о цунами в Черном море на сегодняшний день мало. Это обуславливает необходимость проведения численных расчетов для определения возможных высот волн и наиболее подверженных воздействию цунами участков Черноморского побережья.

Основные исследования черноморских цунами с помощью численного моделирования проведены в [2–8]. Эти работы посвящены изучению динамики волн цунами в акватории Черного моря в целом. В них оценивались возможные высоты уровня моря вдоль побережья при распространении волн из модельных очагов цунами. При этом важно отметить, что отдельные прибрежные участки, в особенности бухты и заливы, требуют более детального

исследования, так как при проникновении в них волн могут происходить значительные усиления колебаний уровня моря.

Во время Ялтинского землетрясения 12 сентября 1927 г. в нескольких пунктах Крымско-Кавказского побережья – от Евпатории до Батуми – прибрежными мареографами были зафиксированы волны цунами. Очевидцы также сообщали о внезапных изменениях уровня моря вдоль различных участков побережья [9, 10]. По их свидетельствам, 12 сентября после главного толчка уровень моря в Балаклавской бухте понизился на 0,7 м, осушив часть бухты, на мели остались небольшие суда и лодки, стоявшие у берега. Затем спустя 40 мин уровень моря начал стремительно нарастать, поднявшись выше среднего более чем на 0,5 м и затопив пространство длиной 15 м. Таким образом, амплитуда колебаний составила ~ 1,2 м [11, 12]. Как утверждали очевидцы, колебания уровня моря в мелководной вершине бухты были особенно заметными. Отмечено, что эти изменения уровня наблюдались при полном штиле. Согласно [11], причиной могли быть сейшевые колебания, вызванные проникновением в бухту волн со стороны открытого моря.

Исходя из свода правил проектирования в цунамиопасных районах ¹ и строительства в сейсмических районах ², для Балаклавской бухты нормативная сейсмическая интенсивность по шкале *MSK-64* для трех степеней сейсмической опасности (10, 5, 1 %) в течение 50 лет составляет 8, 8 и 9 баллов соответственно, что характеризует разрушительное (8 баллов) и опустошительное (9 баллов) землетрясение. К тому же этот район отнесен к особо сейсмоопасной области вследствие того, что здесь проходит граница зон разной балльности землетрясений.

Балаклавская бухта является узкой полузамкнутой бухтой с затрудненным водообменом с акваторией Черного моря. Распространение длинных волн в таких бухтах может сопровождаться значительными подъемами уровня моря и затоплением суши [13]. Поэтому возникает необходимость уточнения характеристик цунамиопасности в Балаклавской бухте на основе численного моделирования.

В работе [14] выполнено моделирование распространения длинной волны в Балаклавской бухте без учета наката на берег. Показано, что при вхождении в бухту амплитуда волны увеличивается в 4–5 раз, вследствие узости и изогнутости бухты наблюдаются довольно продолжительные колебания уровня моря вдоль ее акватории с частичным выходом волн в ее более мелководную зону. Таким образом, допустимо предположить, что цунами могут приводить к образованию в бухте сейш. Согласно [15], в бухтах с открытой внешней границей сейши являются индуцированными, т. е. их возбуждение происходит через открытую границу.

Сейшевые колебания, затрагивающие всю акваторию Черного моря, исследовались в работах [16–18]. Однако конфигурация береговой черты

¹ Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования : СП 292.1325800.2017 : утв. М-вом строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации 23.06.2017 : введ. в действие с 24.12.2017. Москва, 2017. 147 с.

² Строительство в сейсмических районах : СП 14.13330.2018 2018 : утв. М-вом строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации 24.05.2018 : введ. в действие с 25.11.2018. Москва, 2018. 238 с.

и рельеф дна могут оказывать влияние на формирование спектра собственных колебаний каждого залива или бухты [19]. Параметры сейш для конкретной прибрежной области различны вследствие того, что прибрежные акватории значительно различаются своими резонансными характеристиками [20].

Исследование сейшевых колебаний в Балаклавской бухте проводилось в [21], где на основе анализа энергетических зависимостей получены периоды первых четырех мод собственных колебаний.

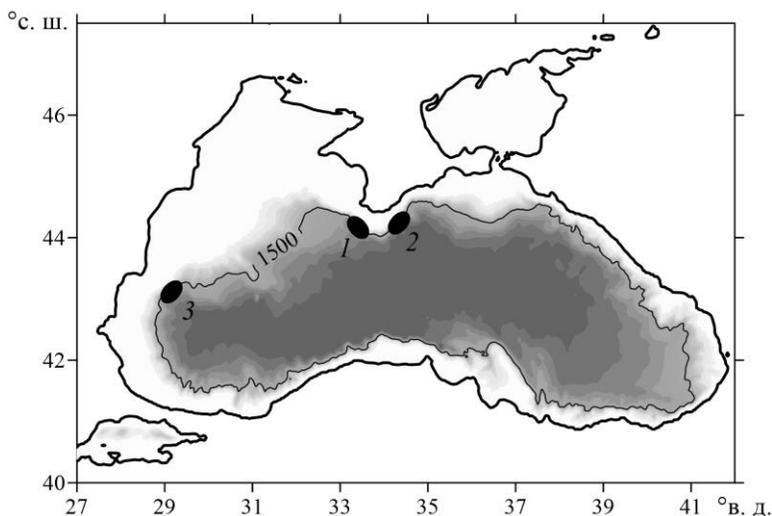
В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту с учетом механизма затопления – осушения побережья. Рассматриваются два вида граничных условий на входе в бухту. В первом случае с помощью нелинейной модели длинных волн решалась задача об эволюции волн цунами в Черном море из трех сейсмических очагов. Получены зависимости от времени колебаний уровня моря на входе в Балаклавскую бухту. При втором виде граничных условий на входе в бухту задавалось начальное возвышение в виде солитона. Эти зависимости использовались в качестве краевых условий на жидкой границе расчетной области для Балаклавской бухты, с помощью модели *Simulating WAves till SHore*³ (*SWASH*) выполнялось численное моделирование распространения волн цунами в бухте с последующим накатом на берег. Часть представленных здесь результатов обсуждалась в диссертационной работе одного из авторов⁴.

Материалы и методы. Для расчетов волн цунами в Азово-Черноморском бассейне использовалась батиметрия, заданная на прямоугольной сетке с 30-секундным пространственным разрешением. Расчеты эволюции цунами в Черном море из сейсмического очага проводились с помощью модели нелинейных длинных волн, описанной в [22]. Моделировалось три случая возникновения цунами с магнитудой 7, так как вблизи Крымского побережья более сильные землетрясения не замечены [1]. Параметры очагов генерации цунами определялись по эмпирическим формулам [23]. Очаги имели эллиптическую форму и были ориентированы вдоль изобаты 1500 м, поскольку все известные черноморские цунамигенные землетрясения происходили на материковом склоне вдоль изобат, не превышающих этой величины. Положение модельных очагов землетрясений для трех случаев цунами приведено на рис. 1.

На первом этапе с помощью модели распространения цунами для всего Черного моря [22] были получены зависимости от времени колебаний уровня моря на подходе к Балаклавской бухте. Затем для каждого очага расчеты цунами в Балаклавской бухте выполнялись по модели *SWASH* на период времени 3 ч с шагом 5 м по пространству и шагом интегрирования по времени 0,01 с.

³ SWASH User Manual. SWASH version 7.01 / The SWASH team. Delft : Delft University of Technology, 2012. 144 p. URL: https://swash.sourceforge.io/online_doc/swashuse/swashuse.html (date of access: 28.06.2022).

⁴ Белоконов А. Ю. Математическое моделирование распространения и трансформации волн цунами в прибрежной зоне : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Севастополь, 2022. 163 с.



Р и с. 1. Положение трех гипотетических очагов цунами в Черном море: 1 – ближний очаг по отношению к Балаклавской бухте; 2 – очаг, подобный вызвавшему Ялтинское землетрясение 12 сентября 1927 г.; 3 – удаленный очаг

F i g. 1. Position of three hypothetical tsunami foci in the Black Sea: 1 – the focus nearest to the Balaklava Bay; 2 – the focus similar to that which caused the Yalta earthquake on September 12, 1927; 3 – the remote focus

Динамика волн в гидродинамической негидростатической модели *SWASH* описывается нелинейными уравнениями мелкой воды, включающими слагаемое с негидростатическим давлением:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right), \quad (2)$$

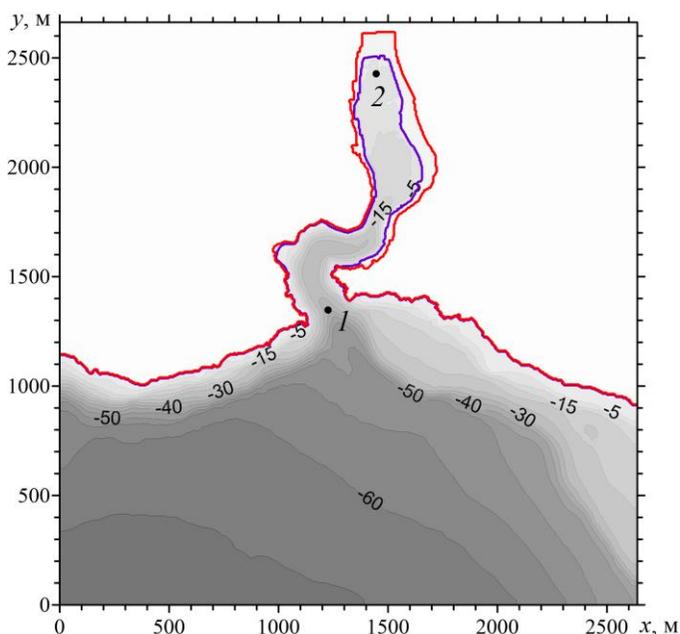
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Здесь t – время; x, y – декартовы координаты; ось z направлена вверх; $\zeta(x, y, t)$ – отклонение свободной поверхности от невозмущенного уровня; $h = d + \zeta$ – полная глубина, равная сумме отклонения свободной поверхности и глубины d при невозмущенном состоянии жидкости; u и v – осредненные по глубине x и y компоненты скорости; $q(x, y, z, t)$ – негидростатическое давление; g – ускорение свободного падения; $c_f = gn^2/h^{1/3}$ – коэффициент донного трения, $n = 0,022$ – параметр шероховатости Маннинга; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx},$

τ_{yy} – компоненты тензора горизонтальных турбулентных напряжений; ν_t – коэффициент турбулентной вязкости.

Расчетная область, включающая рельеф дна и суши Балаклавской бухты, показана на рис. 2.



Р и с. 2. Рельеф дна (м) расчетной области: вход в Балаклавскую бухту – точка 1; вершина бухты – точка 2; линия постоянной глубины – синяя кривая; линия постоянной высоты на суше – красная кривая

F i g. 2. Bottom relief (m) of the calculation domain: entrance to the Balaklava Bay – point 1; the bay top – point 2; line of constant depth – blue curve; line of constant height at land – red curve

В качестве краевых условий на южной границе расчетной области (рис. 2, $y = 0$) использовались мареограммы, полученные с помощью модели распространения цунами для Черного моря [22]. Для выяснения возможности возникновения в Балаклавской бухте сейшевых колебаний при кратковременном внешнем воздействии был выполнен численный эксперимент, в котором волна цунами задавалась в виде одиночной волны – солитона [24]:

$$\zeta(y, t) = \zeta_0 \cosh^{-2} \left(\frac{y - ct}{\lambda} \right), \quad (4)$$

где $\zeta_0 = 0,35$ м – высота солитона; t – время; $\lambda = 2H \sqrt{H/3\zeta_0}$ – горизонтальный масштаб солитона; $c = c_0(1 + \zeta_0/2H)$ – фазовая скорость солитона; $c_0 = \sqrt{gH}$; $H = 70$ м – глубина моря.

Для оценки периодов сейшевых колебаний в бухте мареограммы подвергались спектральному анализу (использовались скрипты, разработанные в [25]).

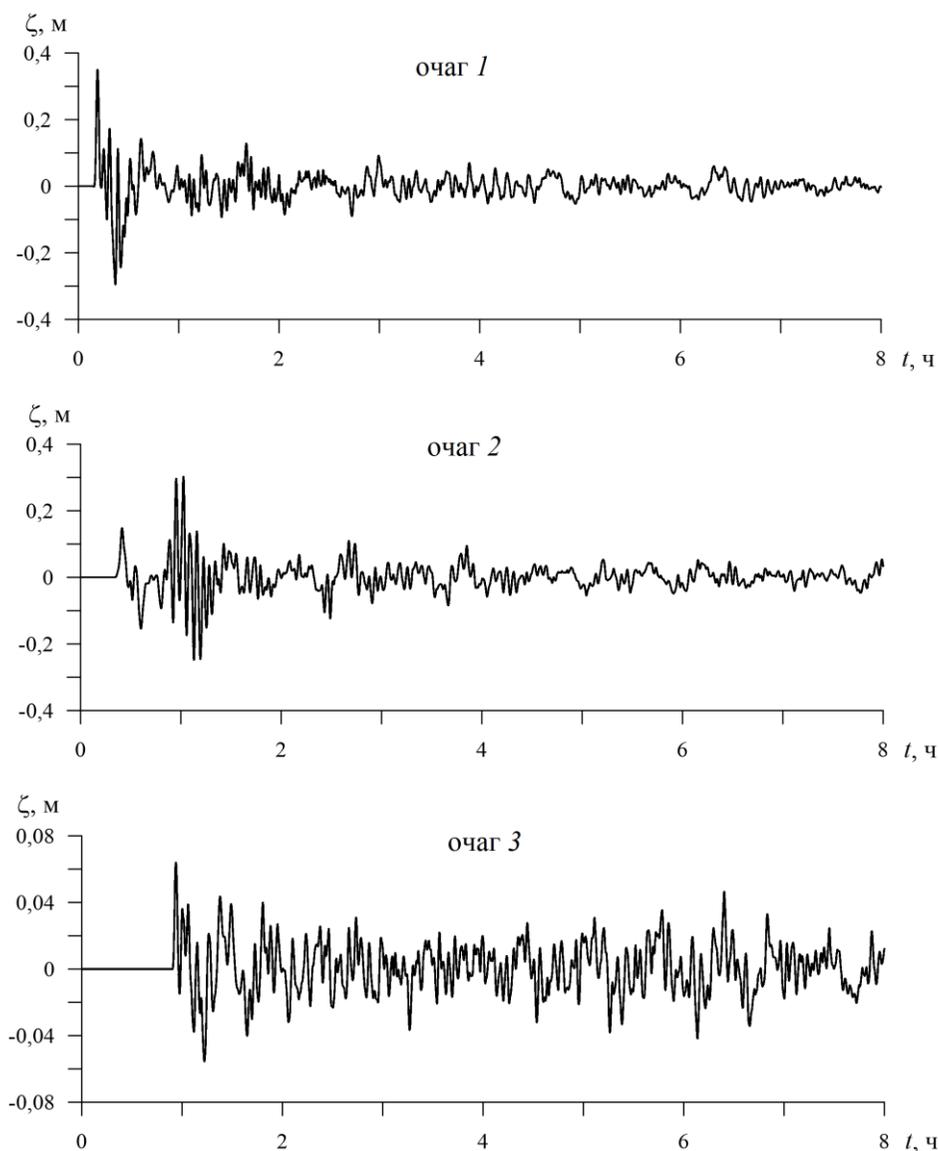
Для анализа воздействия цунами на конкретную прибрежную территорию, согласно своду правил ¹, применяются следующие характеристики: вертикальный заплеск – превышение уровня максимального проникновения цунами (линия заплеска) над невозмущенным уровнем моря во время цунами; глубина потока (динамическая глубина) – уровень воды при цунами, отсчитываемый по вертикали от уровня грунта в данном месте в данный момент времени; горизонтальный заплеск – величина горизонтальной проекции зоны затопления; зона затопления – часть побережья, подвергшегося затоплению, ограниченная сверху линией заплеска.

В каждой точке исследуемой области (x, y) рассчитывалась величина $H_f(x, y) = \max_{0 < t < \tau} [D(x, y, t)] - D(x, y, 0)$, где $D(x, y, t)$ – глубина потока в заданный момент времени; $D(x, y, 0)$ – глубина потока в начальный момент времени; $\tau = 3$ ч – время воздействия цунами. Смысл величины H_f следующий. Если точка (x, y) находится на суше, то H_f соответствует максимально возможной глубине затопления прибрежной полосы. Если точка (x, y) располагается в море, то H_f соответствует максимально возможному подъему уровня моря. Максимально возможная граница зоны затопления (граница максимального вертикального заплеска) определялась по значению $H_f = 0,05$ м.

Результаты исследования и их обсуждение. Для трех очагов генерации цунами рассчитаны мареограммы на взморье Балаклавской бухты (рис. 3) в точке с глубиной 65 м, расположенной на границе расчетной области. Их сопоставление показывает, что для ближних очагов цунами (1 и 2 на рис. 1) максимальные отклонения уровня моря на подходе к бухте составляют $\pm 0,3$ м, для дальнего очага цунами (3 на рис. 1) $\pm 0,05$ м.

Далее для трех случаев проведены расчеты цунами в Балаклавской бухте на сетке высокого разрешения (рис. 2). На рис. 4 показаны колебания уровня моря на входе в Балаклавскую бухту и в ее вершине. Как видно, на входе в бухту амплитуды волн возрастают в 1,5–2 раза по сравнению с амплитудами на южной границе области. При достижении цунами вершины бухты амплитуды колебаний увеличиваются еще примерно в два раза (до 1,4–1,5 м для очагов 1 и 2 и до 0,33 м для очага 3) по сравнению с амплитудами на входе в бухту. Таким образом, внутри бухты высоты цунами увеличиваются в 5–6 раз по сравнению с высотами на южной границе области. Для очагов 1 и 2 максимальные колебания уровня в бухте происходят в начальные 60 мин распространения цунами.

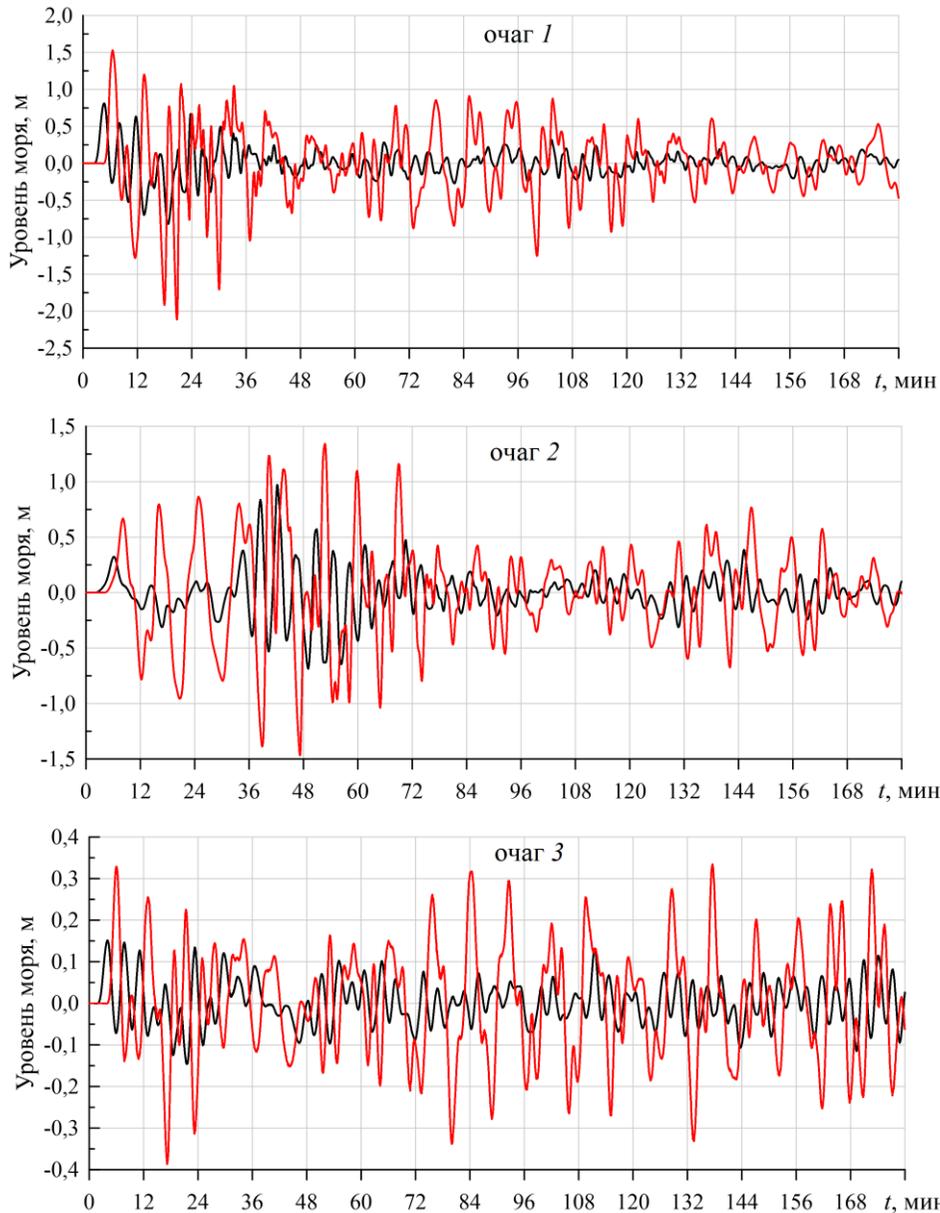
Мареограммы на рис. 4 имеют хорошо выраженный колебательный характер. Это дает основание предположить, что цунами возбуждают в Балаклавской бухте сейшевые колебания. Проведенный анализ графиков позволил построить энергетические спектры колебаний уровня моря для вершины Балаклавской бухты (рис. 5). Видно, что все спектры имеют хорошо выраженный пик в интервале периодов 8–9 мин.



Р и с. 3. Колебания уровня моря на взморье Балаклавской бухты, вызванные очагами цунами 1–3 ($y = 0$)

Fig. 3. Sea level fluctuations at the coast of the Balaklava Bay caused by tsunami foci 1–3 ($y = 0$)

В работе [21] на основе анализа энергетических зависимостей были получены следующие периоды первых четырех мод сейшевых колебаний: $T_0 = 8,2$ мин, $T_1 = 2,5$ мин, $T_2 = 1,9$ мин, $T_3 = 1,3$ мин. Таким образом, во всех трех случаях при проникновении волн цунами в Балаклавскую бухту в ней генерируется низшая мода сейшевых колебаний T_0 (так называемая мода Гельмгольца). Также стоит отметить, что на интервале периодов 2–4 мин имеются незначительные флуктуации энергии, вызванные возбуждением более высоких мод собственных колебаний.

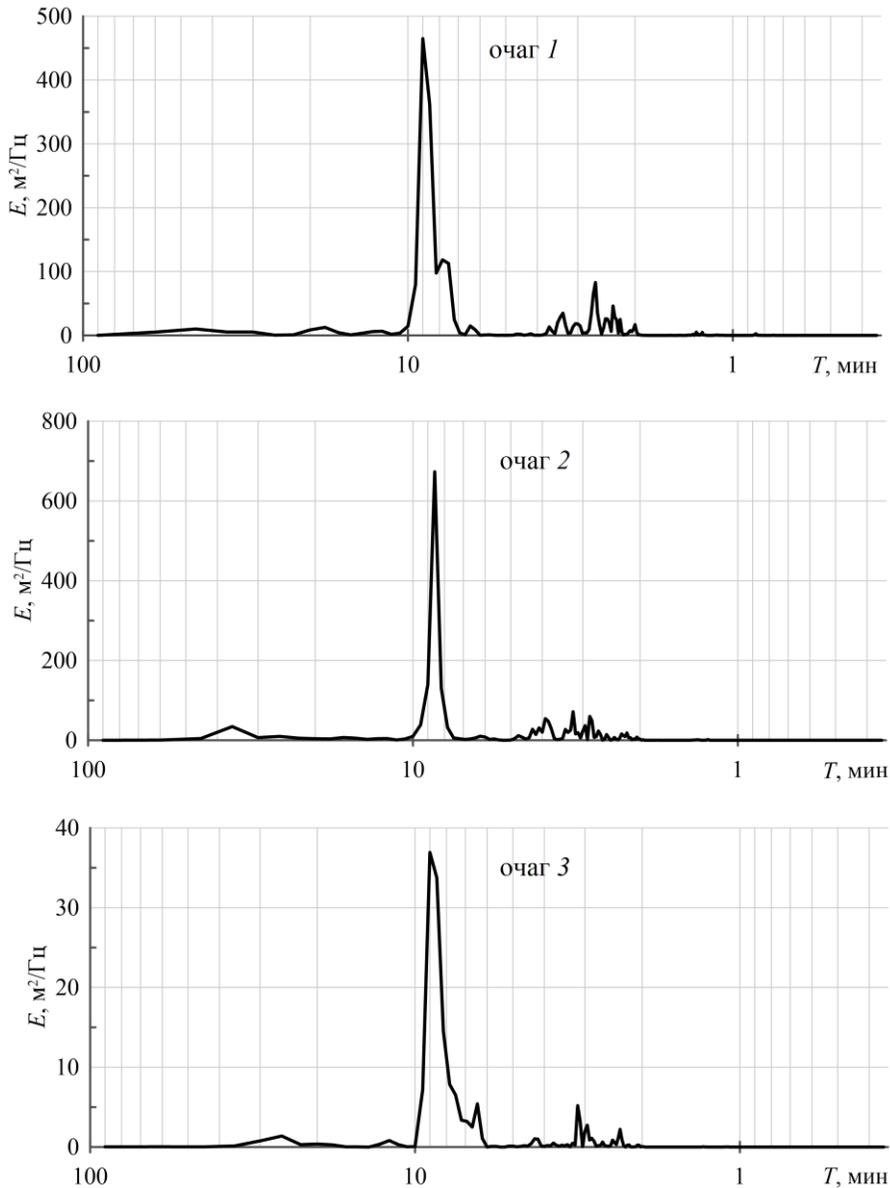


Р и с. 4. Колебания уровня моря в Балаклавской бухте, вызванные очагами цунами 1–3, на входе в бухту (черная кривая) и в ее вершине (красная кривая)

Fig. 4. Sea level fluctuations in the Balaklava Bay caused by tsunami foci 1–3, at the entrance to the bay (black curve) and at its top (red curve)

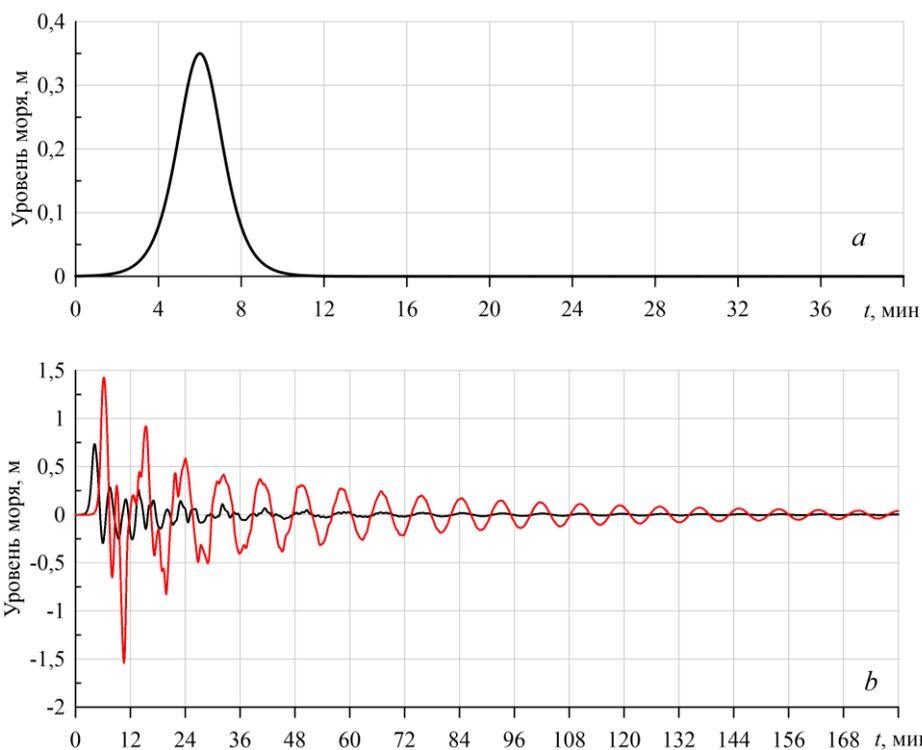
Еще одним этапом работы стало математическое моделирование колебаний уровня в Балаклавской бухте при кратковременном внешнем воздействии. На рис. 6, *a* представлены колебания уровня моря на южной границе расчетной области ($y = 0$) при прохождении солитона в сторону Балаклавской бухты. Вызванные солитоном колебания уровня на входе в бухту (в точке 1)

и в ее вершине (в точке 2) приведены на рис. 6, *b*. Как видно, имеет место периодический режим колебаний с затуханием. На рис. 7 показан соответствующий рис. 6, *a* энергетический спектр колебаний уровня моря в вершине бухты. В спектре прослеживается один пик на периоде 8,5 мин, что очень точно совпадает с периодом низшей сейшевой моды Гельмгольца T_0 .



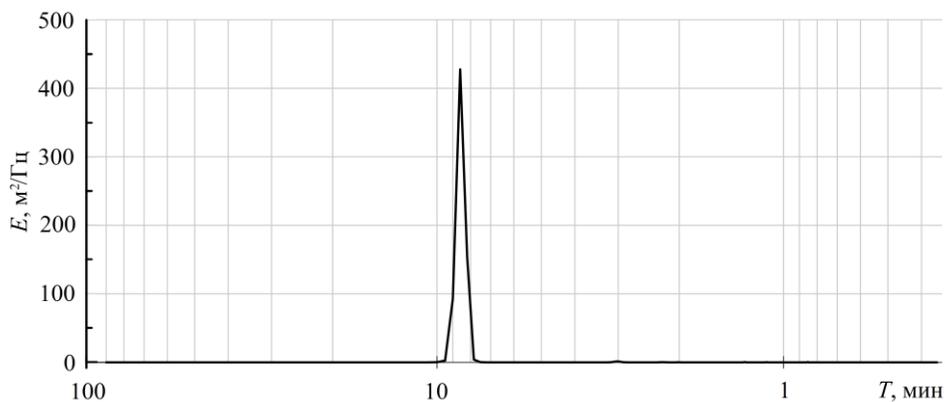
Р и с. 5. Энергетические спектры колебаний уровня моря в вершине Балаклавской бухты для очагов цунами 1–3 (T – период колебаний в логарифмической шкале)

Fig. 5. Energy spectra of sea level fluctuations at the top of the Balaklava Bay for the tsunami foci 1–3 (T is the oscillation period at a logarithmic scale)



Р и с. 6. Колебания уровня на взморье Балаклавской бухты ($y = 0$) (a) и в Балаклавской бухте (b, вход в бухту – черная кривая, ее вершина – красная кривая) при волне цунами, вызванной прохождением солитона (формула (4))

F i g. 6. Sea level fluctuations near the Balaklava Bay ($y = 0$) (a) and in the Balaklava Bay (b, the entrance to the bay – black curve, its top – red curve) for a tsunami wave caused by the propagation of a soliton (formula (4))



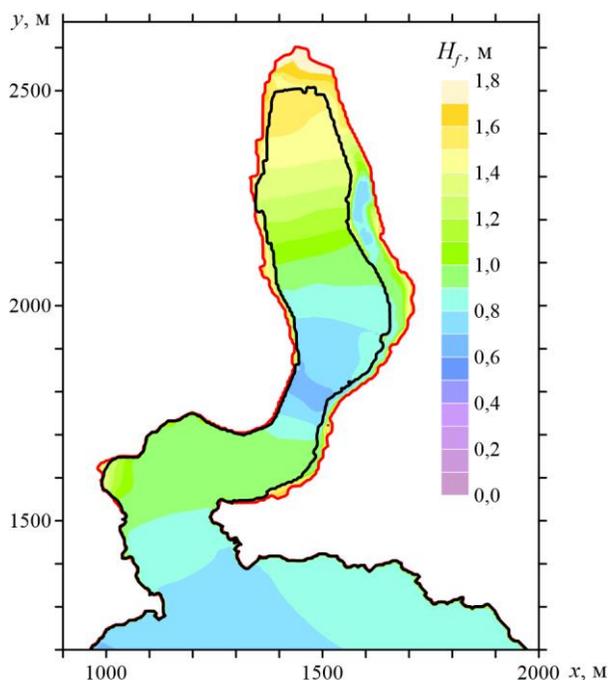
Р и с. 7. Энергетический спектр колебаний уровня моря в вершине Балаклавской бухты для солитона (формула (4))

F i g. 7. Energy spectrum of the sea level fluctuations at the Balaklava Bay top for a soliton (formula (4))

Таким образом, результаты численного моделирования показывают, что при проникновении волн цунами в Балаклавскую бухту в ней будут возбуждаться колебания уровня моря с периодом ~ 8 мин. Эти колебания максимальны в вершине бухты, где подъемы уровня могут достигать 1,4–1,5 м.

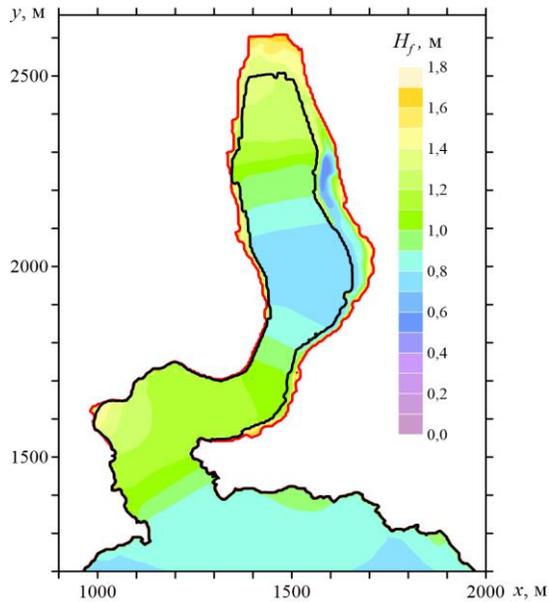
Анализ результатов моделирования цунами в исследуемом районе позволил провести цунамирайонирование береговой полосы Балаклавской бухты и прилегающего морского побережья. Проведенные расчеты показывают, что при проникновении в бухту длинная волна частично отражается от твердых границ ее южной части и частично проходит через коленообразную узость в центральную и северную части бухты. Здесь происходит концентрация волновой энергии и формируются сейшеобразные колебания уровня воды, приводящие к затоплению пологих участков береговой полосы бухты.

На рис. 8–10 для каждого из трех очагов цунами даны картосхемы возможных границ зоны затопления и глубины потока на прилегающем морском побережье и в береговой полосе Балаклавской бухты. Максимально возможные для всех очагов цунами граница зоны затопления и глубина потока показаны на рис. 11. Максимально возможная граница зоны затопления (граница максимального вертикального заплеска) определялась по значению $H_f = 0,05$ м.



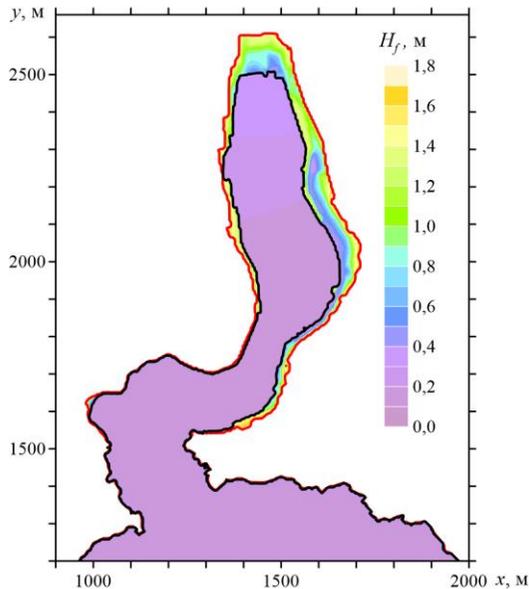
Р и с. 8. Максимально возможные для очага цунами I подъем уровня моря и глубина потока (м) на береговой полосе Балаклавской бухты (изобата 0 м – черная кривая, максимальная протяженность горизонтального заплеска – красная кривая)

Fig. 8. Maximum possible sea level rise and flow depth (m) for the tsunami focus I at the Balaklava Bay coastline (0 m isobath – black curve, maximum spread of a horizontal flooding – red curve)



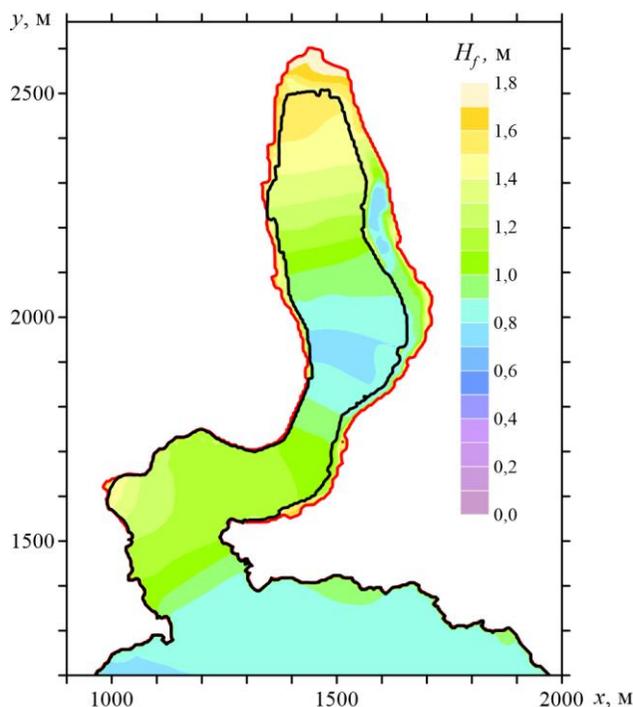
Р и с. 9. Максимально возможные для очага цунами 2 подъем уровня моря и глубина потока (м) на береговой полосе Балаклавской бухты (изобата 0 м – черная кривая, максимальная протяженность горизонтального заплеска – красная кривая)

F i g. 9. Maximum possible sea level rise and flow depth (m) for the tsunami focus 2 at the Balaklava Bay coastline (0 m isobath – black curve, maximum spread of a horizontal flooding – red curve)



Р и с. 10. Максимально возможные для очага цунами 3 подъем уровня моря и глубина потока (м) на береговой полосе Балаклавской бухты (изобата 0 м – черная кривая, максимальная протяженность горизонтального заплеска – красная кривая)

F i g. 10. Maximum possible sea level rise and flow depth (m) for the tsunami focus 3 at the Balaklava Bay coastline (0 m isobath – black curve, maximum spread of a horizontal flooding – red curve)



Р и с. 11. Максимально возможные для всех трех очагов цунами подъем уровня моря и глубина потока (м) на береговой полосе Балаклавской бухты (изобата 0 м – черная кривая, максимальная протяженность горизонтального заплеска – красная кривая)

Fig. 11. Maximum possible sea level rises and flow depths (m) for all three tsunami foci at the Balaklava Bay coastline (0 m isobath – black curve, maximum spread of a horizontal flooding – red curve)

Анализ карт показывает, что наибольшему затоплению подвержены зоны, примыкающие к вершине бухты и к восточному берегу. Это обусловлено тем, что указанные участки береговой полосы являются относительно пологими и низменными по сравнению с другими участками, имеющими более высокие берега и крутые откосы. Согласно результатам моделирования, глубина потока на суше составляет 1,0–1,5 м, глубина потока в вершине бухты 1,8 м. Максимальная протяженность горизонтального заплеска для восточного берега достигает 60 м, для участков суши у вершины 90 м.

Заключение. Представлены результаты численного моделирования проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту. На первом этапе с помощью нелинейной модели длинных волн для всего Черного моря исследовалась эволюция волн цунами из трех сейсмических очагов. Получены мареограммы на входе в Балаклавскую бухту. На втором этапе эти зависимости от времени колебания уровня моря использовались в качестве краевых условий на жидкой границе расчетной области, для которой с помощью модели *SWASH* выполнялось численное моделирование распространения волн цунами в бухте.

Выявлено, что в результате распространения волн в бухте формируются сейшевые колебания уровня моря с периодом ~ 8 мин, соответствующие моде Гельмгольца. Математическое моделирование колебаний уровня в Балаклавской бухте при кратковременном внешнем воздействии показало, что в энергетическом спектре колебаний в вершине бухты прослеживается один пик на периоде 8,5 мин, что очень точно совпадает с периодом низшей сейшевой моды Гельмгольца.

Внутри бухты высоты цунами увеличиваются в 5–6 раз по сравнению с высотами на южной границе области. Колебания уровня моря максимальны в вершине бухты, где подъем достигает 1,4–1,5 м. Наибольшему затоплению Балаклавской бухты подвержены зоны, примыкающие к ее вершине и к восточному берегу. Глубина потока на суше достигает 1,0–1,5 м, в вершине бухты 1,8 м. Максимальная протяженность горизонтального заплеска для восточного берега составляет 60 м, в вершине бухты 90 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никонов А. А., Гусяков В. К., Флейфель Л. Д. Новый каталог цунами в Черном и Азовском морях в приложении к оценке цунамиопасности Российского побережья // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 2. С. 240–255. doi:10.15372/GiG20180208
2. Доценко С. Ф. Численное моделирование цунами в Черном, Азовском и Каспийском морях как необходимый элемент региональных систем раннего предупреждения о цунами // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. Вып. 26, том 2. С. 287–300.
3. Доценко С. Ф., Иванов В. А. Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. Севастополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. 174 с.
4. Доценко С. Ф., Ингеров А. В. Характеристика волн цунами сейсмического происхождения в бассейне Черного моря по результатам численного моделирования // Морской гидрофизический журнал. 2013. № 3. С. 25–34. URL: <http://мгфж.рф/index.php/repository?id=186> (дата обращения: 29.06.2022).
5. Пелиновский Е. Н., Зайцев А. И. Оценка и картирование опасности цунами на Черноморском побережье Украины // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. 2011. № 3(90). С. 44–50. URL: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2011/03/044-050.pdf> (дата обращения: 29.06.2022).
6. Анализ спектральных характеристик черноморских цунами / Р. Х. Мазова [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. 2013. № 2(99). С. 52–66. URL: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2013/02/052-066.pdf> (дата обращения: 29.06.2022).
7. Zaitsev A. I., Pelinovsky E. N. Forecasting of tsunami wave heights at the Russian coast of the Black Sea // Oceanology. 2011. Vol. 51. P. 907–915. <https://doi.org/10.1134/S0001437011050225>
8. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental and numerical data / A. Yalciner [et al.] // Journal of Geophysical Research. Oceans. 2004. Vol. 109, iss. C12. C12023. doi:10.1029/2003JC002113
9. Григораш З. К. Черноморские цунами 1927 года по мареографическим записям // Труды Морского гидрофизического института АН СССР. 1959. Т. XVII. С. 59–67.
10. Никонов А. А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Физика Земли. 1997. № 1. С. 86–96. URL: http://neotec.ginras.ru/comrus/_nikonov-a-a-1997-cunami-na-beregah-chernogo-i-azovskogo-morey.pdf (дата обращения: 30.06.2022).

11. *Вознесенский А. В.* Землетрясения 1927 г. в Крыму // Природа. 1927. № 12. С. 957–974. URL: <https://priroda.ras.ru/djvu/1927-12.djvu> (дата обращения: 30.06.2022).
12. *Двойченко П. А.* Черноморские землетрясения 1927 года в Крыму // Природа. 1928. № 6. С. 524–542. URL: http://neotec.ginras.ru/comrus/_dvoychenko-p-ya-1928-chernomorskie-zemletryaseniya-1927-goda-v-nrymu.pdf (дата обращения: 30.06.2022).
13. *Didenkulova I.* Tsunami runup in narrow bays: the case of Samoa 2009 tsunami // Natural Hazards. 2013. Vol. 65. P. 1629–1636. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0435-7>
14. *Доценко С. Ф., Базыкина А. Ю., Ингеров А. В.* Особенности распространения волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. Вып. 2. С. 11–19. URL: <http://ecological-safety.ru/repository/issues/2017/02/02/20170202.pdf> (дата обращения: 30.06.2022).
15. *Ковалев П. Д., Ковалев Д. П.* Особенности сейшевых колебаний в заливах и бухтах Дальнего Востока: Приморья, Сахалина, южных Курильских островов // Вестник Тамбовского университета. Серия : Естественные и технические науки. 2013. Т. 18, № 4. С. 1377–1382. URL: <http://journals.tsutmb.ru/go/1810-0198/2013/4/1377-1382/> (дата обращения: 30.06.2022).
16. *Курчатов И. В.* Сейши в Черном и Азовском морях // Собрание научных трудов в 6 т. Москва : Наука, 2005. Т. 1. С 30–39. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/kurchatov_sobranie-trudov_t1_2005/go,30/ (дата обращения: 01.07.2022).
17. Результаты численного моделирования поверхностных и внутренних сейшевых колебаний в Черном море / В. Ф. Баклановская [и др.] // Метеорология и гидрология. 1986. № 6. С. 74–81.
18. *Архипкин В. С., Иванов В. А., Николаенко Е. Г.* Моделирование баротропных сейш в южных морях // Моделирование гидрофизических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях. Москва : Наука, 1989. С. 104–117.
19. Сейши в Севастопольской бухте / Ю. Н. Горячкин [и др.] // Труды Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. 2002. Вып. 250. С. 342–353. URL: https://uhmi.org.ua/pub/np/250/29_Repetin.pdf (дата обращения: 01.07.2022).
20. *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. doi:10.22449/0233-7584-2020-4-437-450
21. *Фомин В. В., Лазоренко Д. И., Иванча Е. В.* Численное моделирование сейш в Балаклавской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. Вып. 3. С. 32–39. URL: <http://ecological-safety.ru/repository/issues/2017/03/04/20170304.pdf> (дата обращения: 01.07.2022).
22. *Базыкина А. Ю., Михайличенко С. Ю., Фомин В. В.* Численное моделирование цунами в Черном море, вызванное землетрясением 12 сентября 1927 г. // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 4. С. 318–328. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-318-328
23. Опыт картирования очагов землетрясений / В. И. Уломов [и др.] // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Москва : Институт физики Земли РАН. 1993. Вып. 1. С. 99–108.
24. *Куркин А. А.* Нелинейная и нестационарная динамика длинных волн в прибрежной зоне. Н. Новгород : НГТУ, 2005. 329 с.
25. *Winde H. P.* Wave height from pressure measurements. Delft University of Technology, 2012. 49 p. URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ae3b07efd-1ce9-4fd1-b051-c794c72959ca> (date of access: 01.07.2022).

Об авторах:

Фомин Владимир Владимирович, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 6992-2688, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460, ResearcherID: H-8185-2015**, v.fomin@mhi-ras.ru

Белоконь Александра Юрьевна, младший научный сотрудник, отдел вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 5633-9877, ORCID ID: 0000-0002-1299-0983, ResearcherID: M-6839-2018**, aleksa.44.33@gmail.com

Харитоновна Людмила Викторовна, старший научный сотрудник, отдел вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 7274-6248, ORCID ID: 0000-0003-0705-0812, ResearcherID: Y-1780-2018**, l.kharitonova@mhi-ras.ru

Алексеев Дмитрий Владимирович, ученый секретарь, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 767-834, ORCID ID: 0000-0003-4006-0967, ResearcherID: I-3548-2017, Scopus Author ID: 8284177400**, dalexeev@rambler.ru

Статистическое описание морской поверхности двухкомпонентной гауссовой смесью

А. С. Запевалов [✉], А. С. Князьков

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия,
[✉] sevzepter@mail.ru

Поступила в редакцию 03.04.2022; одобрена после рецензирования 11.04.2022;
принята к публикации 04.05.2022.

Аннотация

Цель. Анализ возможности использования двухкомпонентной гауссовой смеси с неравными дисперсиями для аппроксимации функции плотности вероятностей (*PDF*) возвышений морской поверхности – цель данной работы.

Методы и результаты. Гауссова смесь строится в форме суммы гауссианов с разными весами. Для построения двухкомпонентной гауссовой смеси, учитывая условие, налагаемое на весовые коэффициенты, необходимо задать пять параметров. Для их расчета используются первые четыре статистических момента возвышений морской поверхности. Пятый параметр применяется для выполнения условия одномодальности распределения. Для оценки возможности применения аппроксимаций в форме гауссовой смеси проведено их сравнение с аппроксимацией, построенной на основе распределения Грама – Шарлье, которая ранее тестировалась на данных прямых волновых измерений. Показано, что при положительных значениях коэффициента эксцесса в области изменения случайной величины с единичной дисперсией $|\xi| < 3$ два типа аппроксимаций близки, при отрицательных значениях коэффициента эксцесса заметные расхождения наблюдаются в области $|\xi| < 1$ (здесь ξ нормированное на среднеквадратическое значение возвышение поверхности). Также показано, что аппроксимация *PDF* в форме гауссовой смеси при нулевом значении коэффициента асимметрии может быть получена только при отрицательном значении коэффициента эксцесса.

Выводы. В настоящее время для аппроксимации *PDF* возвышений и уклонов морской поверхности обычно используются модели, построенные на основе усеченных рядов Грама – Шарлье. Их недостатком является ограниченный диапазон, в котором может быть описано распределение моделируемой характеристики. Гауссовы смеси свободны от указанного недостатка. Разработана процедура расчета их параметров. Для уточнения условий, в которых могут использоваться гауссовы смеси, необходимо прямое сопоставление с данными волновых измерений.

Ключевые слова: морская поверхность, плотность вероятностей, гауссова смесь, распределение Грама – Шарлье, асимметрия, эксцесс

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0004.

Для цитирования: Запевалов А. С., Князьков А. С. Статистическое описание морской поверхности двухкомпонентной гауссовой смесью // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т 38, № 4. С. 422–431. doi:10.22449/0233-7584-2022-4-422-431

Statistical Description of the Sea Surface by a Two-Component Gaussian Mixture

A. S. Zapevalov [✉], A. S. Knyazkov

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
[✉] sevzepter@mail.ru

Abstract

Purpose. The aim of the study is to analyze the possibility of applying the two-component Gaussian mixture with unequal dispersions in order to approximate the probability density function (*PDF*) of the sea surface elevations.

Methods and Results. The Gaussian mixture is constructed in the form of a sum of the Gaussians with different weights. Construction of the two-component Gaussian mixture with the regard for the condition imposed on the weight coefficients requires presetting of five parameters. The first four statistical moments of the sea surface elevations are applied for their calculation. The fifth parameter is used to fulfill the condition of unimodal distribution. To assess the possibility of using the approximations in the form of the Gaussian mixture, they were compared with the approximation based on the Gram-Charlier distribution, which was previously tested with direct wave measurement data. It is shown that at positive values of the kurtosis coefficient, in the range of a random value variation with a unit dispersion $|\xi| < 3$, two types of approximations are close; whereas at negative values of the kurtosis coefficient, noticeable discrepancies are observed in the area $|\xi| < 1$ (here ξ is the surface elevation normalized to the RMS value). Besides, it is also demonstrated that at the zero skewness coefficient, the *PDF* approximation in the form of the Gaussian mixture can be obtained at the negative kurtosis coefficient only.

Conclusions. At present, the models based on the truncated Gram-Charlier series, are usually applied to approximate the *PDF* elevations and slopes of the sea surface. Their disadvantage consists in the limited range, in which the distribution of the simulated characteristic can be described. The Gaussian mixtures are free from this disadvantage. A procedure for calculating their parameters is developed. To clarify the conditions under which the Gaussian mixtures can be used, direct comparison with the wave measurement data is required.

Keywords: sea surface, probability density function, Gaussian mixture, Gram-Charlier distribution, skewness, kurtosis

Acknowledgements: the study was carried out within the framework of the state assignment on theme No. 0555-2021-0004.

For citation: Zapevalov, A.S. and Knyazkov, A.S., 2022. Statistical Description of the Sea Surface by a Two-Component Gaussian Mixture. *Physical Oceanography*, 29(4), pp. 395-403. doi:10.22449/1573-160X-2022-4-395-403

Введение

При описании функции плотности вероятностей (*PDF*) возвышений, создаваемых морскими поверхностными волнами, наибольшее распространение получили аппроксимации, построенные на основе рядов Грама – Шарлье [1]. Принципиальная проблема применения этих аппроксимаций связана с тем, что на практике ряды Грама – Шарлье используются в усеченной форме, что позволяет описывать распределение только в ограниченной области изменения случайной величины [2]. Необходимость решения широкого круга прикладных задач, в первую очередь связанных с дистанционным зондированием океана из космоса [3–5], привела к поиску новых подходов к построению аппроксимации *PDF* возвышений морской поверхности.

Недавно для моделирования возвышений морской поверхности было предложено использовать гауссовы смеси [6], которые уже давно получили широкое распространение в других областях при проведении фундаментальных и прикладных исследований [7–9]. Ранее гауссовы смеси использовались для аппроксимации *PDF* уклонов морской поверхности [10, 11].

В общем случае задачи определения числа мод и границ областей одно-модальности для гауссовой смеси не решены [12, 13], поэтому необходима проверка корректности ее использования для каждой физической задачи. Целью настоящей работы является анализ возможности использования и ограничений для двухкомпонентной гауссовой смеси с разными дисперсиями при аппроксимации *PDF* возвышений морской поверхности. Анализ проводится для диапазонов изменения третьего и четвертого статистических моментов возвышений морской поверхности, определенных по данным измерений на Черном море [14].

Двухкомпонентная гауссова смесь

Двухкомпонентная гауссова смесь случайной величины ξ имеет следующий вид [13]:

$$P_s(\xi) = \frac{\alpha_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(\xi-m_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + \frac{\alpha_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(\xi-m_2)^2}{2\sigma_2^2}\right), \quad (1)$$

где α_i – вес i -й компоненты ($i = 1, 2$), $\alpha_i \in (0,1)$; m_i – математическое ожидание; σ_i^2 – дисперсия. Весовые коэффициенты удовлетворяют условию

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1. \quad (2)$$

Для построения модели (1), учитывая условие (2), необходимо найти пять параметров: m_1 , m_2 , σ_1^2 , σ_2^2 , α_1 . В работе [6] предложено рассчитывать их по первым пяти статистическим моментам возвышений морской поверхности. Недостаток такого подхода состоит в том, что по данным натуральных измерений определяются статистические моменты не старше четвертого порядка. Поэтому, следуя [11], для расчета параметров модели будем использовать первые четыре статистических момента, оставляя пятый параметр (α_1) свободным. Параметр α_1 будем варьировать для удовлетворения в *PDF* условия одномодальности.

Статистические моменты случайной величины ξ определены как

$$\mu_j = \int \xi^j P(\xi) d\xi.$$

Для двухкомпонентной гауссовой смеси

$$\mu_j = \alpha_1 \mu_{j,1} + \alpha_2 \mu_{j,2}, \quad (3)$$

где $\mu_{j,i} = \int \xi^j P_i(\xi) d\xi$, $P_i(\xi)$ – первое и второе слагаемые в модели (1).

Общая система для расчета параметров гауссовой смеси была предложена в работе [15]. Далее будем полагать, что дисперсия анализируемой случайной величины ξ равна единице. Принимая средний уровень поверхности равным нулю, учитывая (2) и (3), получаем систему уравнений для расчета параметров модели (1):

$$\alpha_1 m_1 + (1 - \alpha_1) m_2 = 0, \quad (4)$$

$$\alpha_1 (m_1^2 + \sigma_1^2 - 1) + (1 - \alpha_1) (m_2^2 + \sigma_2^2 - 1) = 0, \quad (5)$$

$$\alpha_1 (m_1^3 + 3m_1 \sigma_1^2 - \mu_3) + (1 - \alpha_1) (m_2^3 + 3m_2 \sigma_2^2 - \mu_3) = 0, \quad (6)$$

$$\alpha_1 (m_1^4 + 6m_1^2 \sigma_1^2 + 3\sigma_1^4 - \mu_4) + (1 - \alpha_1) (m_2^4 + 6m_2^2 \sigma_2^2 + 3\sigma_2^4 - \mu_4) = 0. \quad (7)$$

Параметры μ_3 и $\mu_4 - 3$ являются коэффициентами асимметрии и эксцесса соответственно. Систему (4) – (7) будем исследовать при значениях $-0,2 < \mu_3 < 0,4$, $-0,4 < \mu_4 - 3 < 0,4$, что для Черного моря соответствует диапазонам их изменения для ветровых волн и зыби [14].

Следуя подходу [16], сведем систему (4) – (7) к одному уравнению, последовательно исключая неизвестные. Из уравнения (4) имеем $m_2 = \alpha_1 m_1 / (\alpha_1 - 1)$, тогда из уравнений (5) – (7), введя промежуточную неизвестную

$$\beta = \frac{(m_1^2 + \sigma_1^2 - 1)}{m_1} = \frac{(m_2^2 + \sigma_2^2 - 1)}{m_2}, \quad (8)$$

получаем

$$\frac{m_1^3 + 3m_1 \sigma_1^2 - \mu_3}{m_1} = \frac{m_2^3 + 3m_2 \sigma_2^2 - \mu_3}{m_2}, \quad (9)$$

$$\frac{m_1^4 + 6m_1^2 \sigma_1^2 + 3\sigma_1^4 - \mu_4}{m_1} = \frac{m_2^4 + 6m_2^2 \sigma_2^2 + 3\sigma_2^4 - \mu_4}{m_2}. \quad (10)$$

Используя уравнение (8), выразим дисперсии:

$$\sigma_1^2 = m_1 \beta + 1 - m_1^2, \quad \sigma_2^2 = m_2 \beta + 1 - m_2^2.$$

Подставив выражения для σ_1^2 и σ_2^2 в (9), (10), после преобразований получаем

$$m_1 m_2 (3\beta - 2(m_1 + m_2)) = -\mu_3, \quad m_1 m_2 (3\beta^2 - 2(m_1^2 + m_1 m_2 + m_2^2)) = -\mu_4 + 3.$$

После симметричной замены переменных вида $w = m_1 + m_2$ и $v = m_1 m_2$ имеем

$$3\beta v - 2vw = -\mu_3, \quad 3\beta^2 v - 2v(w^2 - v) = -\mu_4 + 3.$$

Объединяя эти два уравнения, получаем
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 38 № 4 2022

$$6v^3 - 2v^2w^2 - 4vw\mu_3 + 3(\mu_4 - 3)v + \mu_3^2 = 0.$$

Обратной заменой выразим переменные w и v через m_1 и окончательно получаем

$$2\alpha_1^2(\alpha_1 - \alpha_1^2 - 1)m_1^6 - 4\mu_3\alpha_1(2\alpha_1 - 1)(\alpha_1 - 1)^2m_1^3 + 3(\mu_4 - 3)\alpha_1(\alpha_1 - 1)^3m_1^2 + \mu_3^2(\alpha_1 - 1)^4 = 0. \quad (11)$$

Таким образом, исходная система уравнений (8) – (11) сведена к одному уравнению шестой степени относительно переменной m_1 с известными величинами μ_3 , μ_4 и свободным параметром α_1 .

Рассмотрим общие свойства разряженного полинома (11) при изменении его коэффициентов. В общем виде

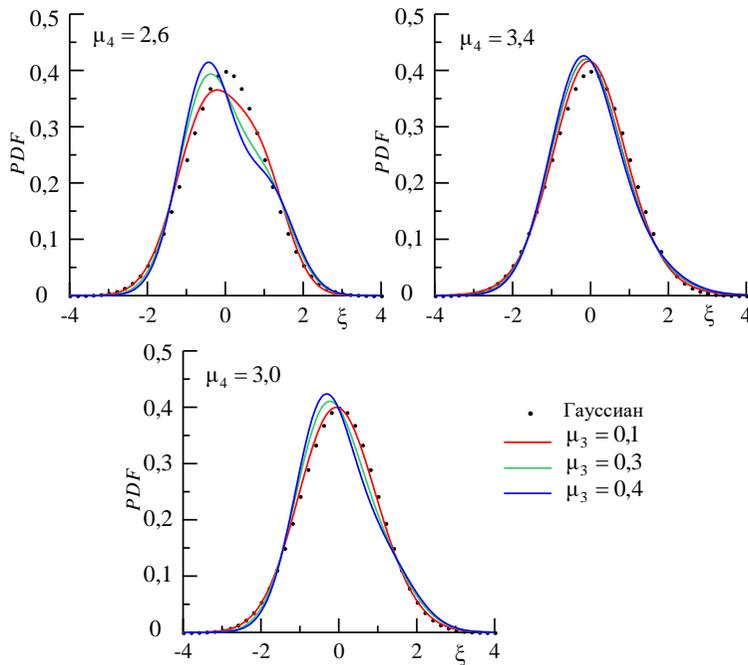
$$b_0m_1^6 + b_3m_1^3 + b_4m_1^2 + b_6 = 0, \quad (12)$$

где $b_0 = 2\alpha_1^2(\alpha_1 - \alpha_1^2 - 1)$; $b_3 = -4\mu_3\alpha_1(2\alpha_1 - 1)(\alpha_1 - 1)^2$; $b_4 = 3(\mu_4 - 3)\alpha_1(\alpha_1 - 1)^3$; $b_6 = \mu_3^2(\alpha_1 - 1)^4$. В диапазоне $\alpha_1 \in (0, 1)$ всегда $b_0 < 0$, $b_6 \geq 0$, причем $b_6 = 0$ только при $\mu_3 = 0$. В случае, когда $b_6 > 0$, из четности степени полинома по правилу Декарта уравнение (12) имеет как положительные, так и отрицательные вещественные корни, так как в ряду его коэффициентов обязательно есть смена знака. При $b_3 > 0$ и $b_4 < 0$ число перемен знака равно трем, а в остальных случаях – только единице. Знак коэффициента b_4 зависит только от знака $\mu_4 - 3$, b_3 может менять знак при изменении как μ_3 , так и α_1 .

Рассмотрим отдельно случай, когда $\mu_3 = 0$. Уравнение (12) примет вид $m_1^2(b_0m_1^4 + b_4) = 0$. Так как $b_0 < 0$, то оно имеет ненулевые вещественные решения только для положительных значений b_4 , что соответствует условию $\mu_4 - 3 < 0$. Таким образом, при $\mu_3 = 0$ и $\mu_4 - 3 > 0$ модель двухкомпонентной смеси не имеет вещественных решений и в принципе не может быть использована. Это ограничение двухкомпонентных смесей получено в общем виде для любого процесса с указанными значениями μ_3 и μ_4 .

Значения m_1 , удовлетворяющие (11), находим численно методом Ньютона для заданных μ_3 и μ_4 , варьируя α_1 . Некоторые из получаемых решений должны быть исключены исходя из условия положительности σ_1^2 и σ_2^2 . Для найденных значений m_1 , удовлетворяющих (11), и соответствующих α_1 с использованием исходной системы (4) – (7) вычислялись m_2 , σ_1^2 , σ_2^2 и строилась *PDF* гауссовой смеси. В общем случае модель (1) может быть как одномодальной, так и бимодальной [13, 17]. Поскольку распределение возвышений ветровых волн является одномодальным, то дополнительно анализировалась производная *PDF* и выбирались только значения параметров, когда $P_s(\xi)$ имеет единственный экстремум (это эквивалентно условию одномодальности).

Наряду с симметрией относительно троек чисел $(m_1, \sigma_1^2, \alpha_1)$ и $(m_2, \sigma_2^2, \alpha_2)$ система уравнений (8) – (10) имеет дополнительное свойство симметрии: замена (m_1, m_2, μ_3) на $(m_1, m_2, -\mu_3)$ дает идентичные решения, поэтому анализ достаточно проводить только для положительных значений μ_3 , т. е. для положительных значений коэффициента асимметрии. Аппроксимации *PDF* в форме (1) представлены на рис. 1.



Р и с. 1. Аппроксимации *PDF* гауссовой смесью
F i g. 1. *PDF* approximations by the Gaussian mixture

Сравнение с распределением Грама – Шарлье

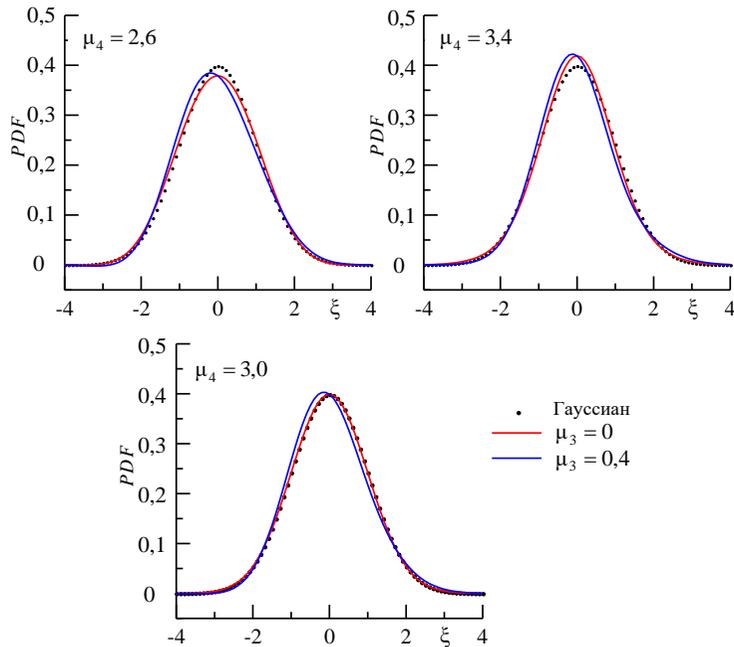
Морское поверхностное волнение является квазигауссовым процессом [1, 18, 19]. Функция плотности вероятностей подобного процесса с единичной дисперсией может быть представлена в следующем виде [2]:

$$P_{G-C}(\xi) = \sum_{i=0}^{\infty} C_i H_i(\xi) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi^2\right), \quad (13)$$

где C_i – коэффициенты ряда; H_i – ортогональные полиномы Эрмита i -го порядка. Коэффициенты C_i рассчитываются по статистическим моментам. Поскольку для возвышений морской поверхности известны статистические моменты только до четвертого порядка включительно, вместо (13) получаем

$$P_{G-C}(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi^2\right) \left\{ 1 + \frac{\mu_3}{6} H_3(\xi) + \frac{(\mu_4-3)}{24} H_4(\xi) \right\}. \quad (14)$$

Аппроксимации PDF в форме (14) представлены на рис. 2. Разложение функции в ряд, включающий относительно небольшое число членов, приводит к сужению области, где справедлива данная аппроксимация [2]. В частности, видно, что функция $P_{G-C}(\xi)$ при значениях μ_3 и μ_4 , определенных в натуральных экспериментах, может принимать отрицательные значения.

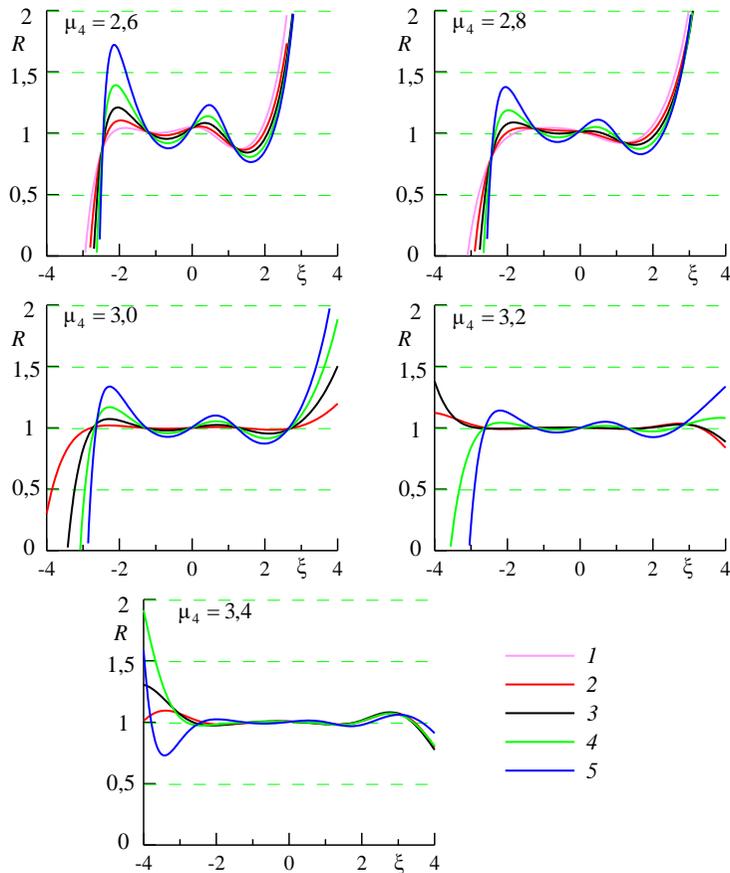


Р и с. 2. Аппроксимации PDF распределением Грама – Шарлье
F i g. 2. PDF approximation by the Gram – Charlier distribution

Ранее аппроксимация (14) сравнивалась с эмпирическими PDF возвышенной морской поверхности, полученными по измерениям морских волн, проведенным на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института [20]. Средняя по ансамблю ситуаций относительная ошибка ε для диапазона $|\xi| < 3$ лежит в пределах $-0,02 \dots 0,07$. Разброс значений ε в области $|\xi| < 1$ не превышает уровня 0,08, за пределами указанной области разброс быстро растет.

Верифицированная по данным натуральных измерений аппроксимация (14) может быть использована для предварительной оценки корректности $P_S(\xi)$. Отношение $R(\xi) = P_{G-C}(\xi)/P_S(\xi)$ представлено на рис. 3. Видно, что в случае, когда эксцесс меньше нуля, функции $P_S(\xi)$ и $P_{G-C}(\xi)$ заметно различаются. Причем различия наблюдаются даже в области $|\xi| < 1$, где, как отмечено выше, наблюдалось совпадение $P_{G-C}(\xi)$ с данными волновых измерений.

При положительных значениях эксцесса в области $|\xi| < 3$ функции $P_S(\xi)$ и $P_{G-C}(\xi)$ близки.



Р и с. 3. Зависимости соотношения $R = P_{G-C}/P_S$ от параметров μ_3 и μ_4 . Кривые 1–5 соответствуют значениям μ_3 от 0 до 0,4 с шагом 0,1

Fig. 3. Dependences of ratio $R = P_{G-C}/P_S$ on the parameters μ_3 and μ_4 . Curves 1–5 correspond to the μ_3 values from 0 to 0.4 with a step 0.1

Оценка достоверности аппроксимации *PDF* возвышений морской поверхности гауссовой смесью путем сравнения с распределением, построенным на основе усеченного ряда Грама – Шарлье, является предварительной. Следующим шагом должно быть прямое сравнение $P_S(\xi)$ с эмпирическими *PDF* возвышений морской поверхности.

Заключение

Основные результаты проведенного исследования следующие.

1. Разработана методика расчета параметров двухкомпонентной гауссовой смеси для аппроксимации *PDF* возвышений морской поверхности. Ана-

лиз проводился для диапазонов изменений третьего (μ_3) и четвертого (μ_4) статистических моментов возвышений морской поверхности, определенных по данным прямых волновых измерений на Черном море.

2. Выделены свойства симметрии уравнений для гауссовой смеси, сокращающие объем вычислений. В общем виде показано, что аппроксимации *PDF* в форме гауссовой смеси в частном случае $\mu_3 = 0$ могут быть получены только при условии $\mu_4 < 3$.

3. Проведено сравнение аппроксимации *PDF* в форме двухкомпонентной гауссовой смеси и аппроксимации, построенной на основе усеченных рядов Грама – Шарлье. При $\mu_4 > 3$ в области $|\xi| < 3$ аппроксимации близки, при $\mu_4 < 3$ наблюдаются значительные расхождения. Для уточнения условий, в которых могут использоваться гауссовы смеси, необходимо прямое сопоставление с данными волновых измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Longuet-Higgins M. S. The effect of non-linearities on statistical distributions in the theory of sea waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 1963. Vol. 17, iss. 3. P. 459–480. <https://doi.org/10.1017/S0022112063001452>
2. Kwon O. K. Analytic expressions for the positive definite and unimodal regions of Gram-Charlier series // *Communications in Statistics – Theory and Methods*. 2022. Vol. 51, iss. 15. P. 5064–5084. doi:10.1080/03610926.2020.1833219
3. Cox C., Munk W. Measurements of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter // *Journal of the Optical Society of America*. 1954. Vol. 44. P. 838–850. <https://opg.optica.org/josa/abstract.cfm?URI=josa-44-11-838>
4. Bréon F. M., Henriot N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2006. Vol. 111, iss. C6. C06005. <https://doi.org/10.1029/2005JC003343>
5. Pokazeev K. V., Zapevalov A. S., Pustovoytenko V. V. The simulation of a radar altimeter return waveform // *Moscow University Physics Bulletin*. 2013. Vol. 68. P. 420–425. <https://doi.org/10.3103/S0027134913050135>
6. Gao Z., Sun Z., Liang S. Probability density function for wave elevation based on Gaussian mixture models // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 213. 107815. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107815>
7. Teicher H. Identifiability of finite mixtures // *The Annals of Mathematical Statistics*. 1963. Vol. 34, iss. 4. P. 1265–1269. doi: 10.1214/aoms/1177703862
8. Ray S., Ren D. On the upper bound of the number of modes of a multivariate normal mixture // *Journal of Multivariate Analysis*. 2012. Vol. 108. P. 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.jmva.2012.02.006>
9. Améndola C., Engström A., Haase C. Maximum number of modes of Gaussian mixtures // *Information and Reference: A Journal of the IMA*. 2020. Vol. 9, iss. 3. P. 587–600. <https://doi.org/10.1093/imaia/iaz013>
10. Tatarskii V. I. Multi-Gaussian Representation of the Cox–Munk Distribution for Slopes of Wind-Driven Waves // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2003. Vol. 20, iss. 11. P. 1697–1705. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<1697:MR0TCD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<1697:MR0TCD>2.0.CO;2)
11. Зapeвалов А. С., Патнер Ю. Б. Аналитическая модель плотности вероятностей уклонов морской поверхности // *Морской гидрофизический журнал*. 2003. № 1. С. 3–17.
12. Апрашова Н. Н., Сорокин С. В. Заметки о гауссовых смесях. Москва : Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, 2015. 144 с. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33609.34404>

13. *Aprausheva N. N., Sorokin S. V.* Exact equation of the boundary of unimodal and bimodal domains of a two-component Gaussian mixture // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2013. Vol. 23. P. 341–347. <https://doi.org/10.1134/S1054661813030024>
14. *Запевалов А. С., Гармаишов А. В.* Появление отрицательных значений коэффициента асимметрии морских поверхностных волн // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2022. Т. 58, № 3. С. 310–317. <https://doi.org/10.31857/S0002351522030130>
15. *Pearson K.* Contributions to the mathematical theory of evolution // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. (A.). 1894. Vol. 185. P. 71–110. <https://doi.org/10.1098/rsta.1894.0003>
16. *Cohen A. C.* Estimation in Mixtures of Two Normal Distributions // *Technometrics*. 1967. Vol. 9, iss. 1. P. 15–28. doi: 10.1080/00401706.1967.10490438
17. *Carreira-Perpiñán M. Á.* Mode-finding for mixture of Gaussian distributions // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000. Vol. 22, iss. 11. P. 1318–1323. doi:10.1109/34.888716
18. *Запевалов А. С., Гармаишов А. В.* Асимметрия и эксцесс поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 4. С. 447–459. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-4-447-459>
19. *Бабанин А. В., Полников В. Г.* О негауссовости ветровых волн // *Морской гидрофизический журнал*. 1994. № 3. С. 79–82.
20. *Запевалов А. С., Большаков А. Н., Смоллов В. Е.* Моделирование плотности вероятностей возвышений морской поверхности с помощью рядов Грама – Шарлье // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 3. С. 432–439.

Об авторах:

Запевалов Александр Сергеевич, главный научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследований, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **Scopus Author ID: 7004433476**, **Web of Science ResearcherID: V-7880-2017**, sevzepter@mail.ru

Князьков Александр Сергеевич, ведущий инженер, центр коллективного пользования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-1119-1757**, fizfak83@yandex.ru

Интегральная первичная продукция в глубоководных районах Черного моря в 1998 – 2015 годах

И. В. Ковалёва^{1,✉}, В. В. Суслин²

¹ ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
✉ ila.82@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2022; одобрена после рецензирования 19.04.2022; принята к публикации 04.05.2022.

Аннотация

Цель. С помощью математического моделирования по данным спутниковых измерений оценить ежемесячные изменения интегральной первичной продукции в глубоководной зоне Черного моря за 1998–2015 гг. – цель данной работы.

Методы и результаты. По данным спутниковых наблюдений *SeaWiFS* и *MODIS* проведены расчеты интегральной первичной продукции с помощью модифицированной авторами модели. Использовался разработанный в Морском гидрофизическом институте РАН алгоритм для восстановления концентрации хлорофилла *a* по данным спутниковых измерений в видимом диапазоне спектра, полученный на основе измерений *in situ* за период 1997–2015 гг. Применяемые коэффициенты яркости моря для трех длин волн 490, 510 и 555 нм позволяют учесть поглощение окрашенного растворенного вещества, они слабо чувствительны к ошибкам атмосферной коррекции и обратному рассеянию света взвесью. Для расчета интегральной первичной продукции использовалась адаптированная модель Бехренфилда и Фальковского с применением физиологических параметров фитопланктона, полученных по данным *in situ* для Черного моря. Представлены данные сезонной изменчивости осредненных за двухнедельный период величин первичной продукции в центральной части Черного моря за 1998–2015 гг.

Выводы. Продуктивность в столбе воды для глубоководной зоны (от 500 м) за 18 лет в среднем составляла 157–158 гС·м⁻²·год⁻¹. Наблюдаются три периода повышения интегральной первичной продукции в течение годового цикла: зимне-весенний, летний и позднеосенний. Тренды продуктивности за исследованный отрезок времени не наблюдались. Снижение показателей зафиксировано после 2008 г. В восточном и западном глубоководных районах характер изменения первичной продукции был сходен. Полученные величины продуктивности за 1998–2015 гг. согласуются с данными ранних исследований. В Черном море наблюдается смена периодов повышения и снижения продукционных показателей, связанная преимущественно с климатическим воздействием.

Ключевые слова: первичная продукция, Черное море, фитопланктон, модельные расчеты, спутниковые наблюдения

Благодарности: авторы благодарят доктора биологических наук профессора З. З. Финенко за участие в обсуждении результатов. Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме № 121041400077-1 «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» и частично в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений».

Для цитирования: Ковалёва И. В., Суслин В. В. Интегральная первичная продукция в глубоководных районах Черного моря в 1998–2015 годах // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 4. С. 432–445. doi:10.22449/0233-7584-2022-4-432-445

Integrated Primary Production in the Deep-Sea Regions of the Black Sea in 1998–2015

I. V. Kovalyova ^{1,✉}, V. V. Suslin ²

¹ A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
Sevastopol, Russia

² Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ ila.82@mail.ru

Abstract

Purpose. The work is aimed at estimating monthly changes in the integrated primary production in the deep-sea zone of the Black Sea in 1998–2015 using mathematical modeling based on the satellite measurements.

Methods and Results. Based on the *SeaWiFS* and *MODIS* satellite observations, the integral primary production was calculated using the model modified by the authors. The algorithm developed in the Marine Hydrophysical Institute, RAS based on the *in situ* measurements performed in 1997–2015, was used for reconstructing the chlorophyll *a* concentration by the satellite measurements in the spectrum visible range. The applied sea brightness coefficients for three wavelengths 490, 510 and 555 nm permitted to take into account the colored solute absorption; they are weakly sensitive to the errors of atmospheric correction and to the light backscattering by suspension. The integral primary production was calculated using the Behrenfeld and Falkowski adapted model that had included the phytoplankton physiological parameters derived from the *in situ* data for the Black Sea. The data on seasonal variability of the fortnight-averaged primary production values for the central part of the Black Sea in 1998–2015 are presented.

Conclusions. Over 18 years, in the deep-sea zone (below 500 m), productivity in the water column averaged 157–158 gC · m⁻²·year⁻¹. In course of an annual cycle, three periods of increase in the integral primary production, namely the winter-spring, summer and late autumn ones were observed. No productivity trends were noted over the time period under study. The decline of indicators was recorded after 2008. In the eastern and western deep-sea regions, the characters of the primary production changes were similar. The productivity values obtained for 1998–2015 are consistent with those of the previous studies. In the Black Sea, observed are the alternating periods of increase and decrease in the production indicators that is conditioned mainly by climatic effects.

Keywords: primary production, Black Sea, phytoplankton, model calculations, satellite observations

Acknowledgements: the authors thank PhD (biol.) Professor Z. Z. Finenko for participating in discussion of the results. The study was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center IBSS on theme No. 121041400077-1 “Functional, metabolic and toxicological aspects of existence of hydrobionts and their populations in biotopes with different physical-chemical regimes”, and partially within the framework of the state assignment on theme No. 0827-2018-0002 “Development of operational oceanology methods based on interdisciplinary research of the processes of marine environment formation and evolution, and on mathematical modeling using the data of remote and contact measurements”.

For citation: Kovalyova, I.V. and Suslin, V.V., 2022. Integrated Primary Production in the Deep-Sea Regions of the Black Sea in 1998–2015. *Physical Oceanography*, 29(4), pp. 404-416. doi:10.22449/1573-160X-2022-4-404-416

Введение

Исследование продуктивности фитопланктона – первого звена в трофической цепи водных экосистем – одна из важных задач в океанологии. Про-

цесс фотосинтеза является ключевой частью биогеохимического цикла, в ходе которого происходит обмен углекислым газом и кислородом между океаном и атмосферой, что оказывает влияние на климат. Оценки показателя продуктивности за длительные периоды необходимы для прогнозирования экологического состояния экосистемы водоемов. Особый интерес представляет интегральная первичная продукция в столбе воды, которая отражает суммарное новообразование органического вещества в слое фотосинтеза. Такие исследования для Черного моря проводились ранее [1–11] с использованием как прямых измерений радиоуглеродным методом, так и расчетных с привлечением данных спутниковых наблюдений. Сложность проведения прямых измерений интегральной первичной продукции, требующих больших временных и материальных затрат, стала причиной сведения к минимуму таких исследований. Поэтому основной массив данных прямых измерений получен преимущественно в прошлом столетии. На сегодняшний день в основном используются расчетные методы с включением в модели более доступных характеристик фитопланктона, а также данных со спутников. В то же время спутниковые измерения позволили вывести исследования на новый уровень и стали толчком к интенсивному развитию расчетных моделей и исследованиям в глобальных масштабах.

Моделированию интегральной первичной продукции в Мировом океане и в Черном море посвящено немало работ [3, 8, 10–15]. Однако оценка интегральной первичной продукции в различных районах Черного моря в отличие от продуктивности в поверхностном слое проводилась нечасто как в прошлом столетии [1, 3, 16], так и после 2000 г. [5, 7, 8, 11, 17]. Поэтому актуальной задачей является анализ изменчивости величин интегральной первичной продукции с использованием модельных расчетов и спутниковых данных за последние два десятилетия.

Материалы и методы исследования

В работе использовались спутниковые данные (*SeaWiFS*\R2018.0\MLAC\Level-2, *MODIS-Aqua*\R2018.0\LAC\Level-2 и *MODIS-Terra*\R2018.0\LAC\Level-2) второго уровня, которые включают время измерения, географическую привязку, спектр коэффициента яркости моря, концентрацию хлорофилла *a*, рассчитанную на основе алгоритма, разработанного в Морском гидрофизическом институте РАН (для *SeaWiFS* и *MODIS*) [18, 19]. Средняя относительная ошибка восстановления концентрации хлорофилла *a* по использованному алгоритму составила ~ 30% [20]. Измерения спутниковыми сканерами проводились с пространственным разрешением ~ 1 км в надире для *MODIS* и ~ 4 км для *SeaWiFS*. Концентрация хлорофилла *a* получена на пространственной сетке 0,025° по широте и 0,035° по долготе. Измерения спутниковым сканером *SeaWiFS* проводились в 1998–2008 гг., приборами *MODIS-Aqua* и *MODIS-Terra* – в 2008–2015 гг. (URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Данные о температуре в поверхностном слое за период 1998–2000 гг. взяты с сайта <http://podaac.jpl.nasa.gov/sst/>, за период 2000–2015 гг. – с сайта <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>. Данные о фотосинтетически активной радиации (ФАР), достигающей поверхности моря, взяты с сайта

<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> для трех оптических сканеров *SeaWiFS*¹ и *MODIS-Aqua/Terra*².

Концентрация хлорофилла *a* и показатель диффузного ослабления света, полученные по снимкам разных сканеров, рассчитывались по единому алгоритму [18, 19]. Различие в расчете величин заключалось в использовании констант (показатели поглощения света чистой морской воды, отношение показателей поглощения фитопланктона, поглощение растворенного органического вещества, солнечная постоянная), так как разные сканеры имели отличный друг от друга набор спектральных каналов в диапазоне 480–560 нм. Точность восстанавливаемого спутникового продукта концентрации хлорофилла *a* считалась одинаковой [20].

Расчет интегральной первичной продукции проводился по адаптированной для Черного моря модели Бехренфилда и Фальковского [21]:

$$PP = P_{opt}^B DL Chl_0 Z_{eu} \frac{0,66E_0}{E_0 + 4.1}, \quad (1)$$

где *PP* – чистая интегральная суточная первичная продукция ($\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$); P_{opt}^B – максимальная часовая скорость фотосинтеза, нормированная на хлорофилл ($\text{мгС} \cdot \text{мгХл}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$); *DL* – длительность светового дня (ч); *Chl*₀ – концентрация хлорофилла *a* в поверхностном слое ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$); *Z*_{eu} – глубина эвфотической зоны (м); *E*₀ – количество солнечной энергии, падающей на поверхность моря (моль квантов $\cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$). Суть адаптации заключалась в использовании входящих в уравнение расчетных параметров, полученных для черноморского фитопланктона по экспедиционным данным³.

Глубина эвфотической зоны рассчитывалась по степенному уравнению, полученному для Черного моря [22]:

$$Z_{eu} = 7,0 / (k_d(490))^{0,69} + 3,0, \quad (2)$$

где *k*_d(490) – показатель диффузного ослабления света (м^{-1}), рассчитанный по алгоритму, адаптированному для Черного моря [23]. Разработанный способ расчета *k*_d(490) учитывает «цветение» диатомовых и тем самым лучше описывает сезонный ход. Погрешность уравнения (2) составляет ~ 20% [23].

По результатам, приведенным в [4], были рассчитаны средние значения P_{opt}^B для температур 5–26°C с интервалом один градус. По полученным данным рассчитано общее уравнение, связывающее P_{opt}^B с температурой (*T*) [13]:

$$P_{opt}^B = a \exp(bT), \quad (3)$$

где $a = 1,4 \pm 0,2$ и $b = 0,06 \pm 0,01$ – безразмерные коэффициенты. Коэффициент детерминации для уравнения (3) $r^2 = 0,77$, уровень значимости $p < 0,0001$.

¹ URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/ORBVIEW-2/SEAWIFS/L2/OC/2018/> (дата обращения: 05.07.2022).

² URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS/L2/OC/2018/> (дата обращения: 06.07.2022), URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/TERRA/MODIS/L2/IOP/2018/> (дата обращения: 05.07.2022).

³ Ковалёва И. В. Моделирование сезонной и многолетней изменчивости первичной продукции фитопланктона в Черном море : дис. ... канд. биол. наук. Севастополь, 2017. 147 с.

Однако уравнение (3) будет менее точным, если глубина нахождения максимума хлорофилла *a* и максимума фотосинтеза будет совпадать или когда максимум хлорофилла *a* будет находиться в поверхностном слое и резко уменьшаться с глубиной. В таком случае по расчетным данным продукция будет несколько завышена³. Погрешность модели в таком виде для Черного моря – менее 30%. При сопоставлении расчетных и измеренных радиоуглеродным методом данных $r^2 = 0,77 - 0,88$ для указанной модели [13].

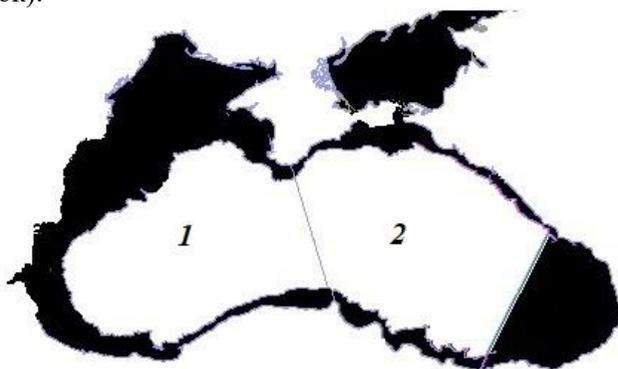
Оценка статистических показателей осуществлялась в программах *SigmaPlot*, *Grapher*, *Excel*.

Для акватории Черного моря сканер *SeaWiFS* давал одну сцену в сутки, *MODIS-Aqua* и *MODIS-Terra* – от одной до двух сцен в сутки. В настоящей работе рассмотрен период 1998–2015 гг.: в 1998–2000 гг. ежесуточное покрытие Черного моря составляло один снимок, с 2000 г. по июль 2002 г. – от двух до трех снимков, с июля 2002 г. по декабрь 2008 г. – от трех до пяти снимков, в 2009–2015 гг. – от двух до четырех снимков. В связи с этим для осреднения данных выбран период, составляющий две недели, что является компромиссным решением при выборе между количеством данных второго уровня и процентом заполнения данными акватории Черного моря в условиях облачности.

В среднем в течение 1998–2015 гг. обеспеченность двухнедельных данных по пространству с учетом облачности зависела от сезона: с марта по октябрь – 70% и выше, с ноября по февраль – 40% и выше. Подробный анализ обеспеченности спутниковыми продуктами приведен в работе [19].

По данным сканеров *SeaWiFS*, *MODIS-Aqua*, *MODIS-Terra* для каждой ячейки сетки, покрывающей регион, считалось среднее значение соответствующего регионального продукта (концентрация хлорофилла *a*, показатель вертикального ослабления света на длине волны 490 нм) за двухнедельный период, а затем определялось среднее по пространству. Для нахождения объединенного (*merge*) продукта рассчитывалось среднее значение для всех сканеров, которые работали в рассматриваемый период времени³.

Расчеты проводились для глубоководной области Черного моря (от 500 м) (рисунок).



Р и с у н о к. Исследуемые районы Черного моря: 1 – глубоководная часть, включающая западный циклональный круговорот; 2 – глубоководная часть, включающая восточный циклональный круговорот

Figure. The Black Sea regions under study: 1 – deep-sea part including the western cyclonic gyre; 2 – deep-sea part including the eastern cyclonic gyre

Результаты

Проведены расчеты первичной продукции в столбе воды для глубоководной части Черного моря. Осредненные значения за каждые две недели за 18-летний период представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Значения интегральной первичной продукции $\langle PP \rangle$ ($\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) в глубоководных районах Черного моря, осредненной за период 1998–2015 гг., для первой (1) и второй (2) половины месяца, стандартное отклонение (SD), минимальная (PP_{\min}) и максимальная (PP_{\max}) величины интегральной первичной продукции
Values of integral primary production $\langle PP \rangle$ ($\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$) in the Black Sea deep-sea regions averaged over 1998–2015 for the first (1) and the second (2) halves of a month, standard deviation (SD), minimum (PP_{\min}) and maximum (PP_{\max}) values of integral primary production

Месяц / Month	Район 1 / Region 1				Район 2 / Region 2			
	$\langle PP \rangle$	SD	PP_{\min}	PP_{\max}	$\langle PP \rangle$	SD	PP_{\min}	PP_{\max}
Январь (1) / January (1)	390	85	261	539	409	80	291	559
Январь (2) / January (2)	380	77	253	603	400	99	293	704
Февраль (1) / February (1)	339	42	266	441	374	51	258	457
Февраль (2) / February (2)	388	95	251	626	389	91	221	549
Март (1) / March (1)	320	71	204	482	344	76	216	496
Март (2) / March (2)	688	197	392	1149	701	179	318	990
Апрель (1) / April (1)	679	282	366	1450	568	222	222	1105
Апрель (2) / April (2)	343	168	178	872	319	131	168	680
Май (1) / May (1)	334	118	173	726	320	89	182	522
Май (2) / May (2)	322	78	178	467	306	64	188	408
Июнь (1) / June (1)	348	73	213	450	351	75	245	452
Июнь (2) / June (2)	413	91	252	547	399	67	274	517
Июль (1) / July (1)	511	90	330	657	471	83	294	617
Июль (2) / July (2)	536	84	367	683	532	78	349	622
Август (1) / August (1)	565	72	442	676	547	76	389	653
Август (2) / August (2)	526	60	382	656	540	62	429	647
Сентябрь (1) / September (1)	470	75	379	649	479	59	375	640
Сентябрь (2) / September (2)	437	79	328	593	442	61	366	602
Октябрь (1) / October (1)	404	78	301	610	406	70	259	551
Октябрь (2) / October (2)	369	62	261	497	371	46	296	448
Ноябрь (1) / November (1)	376	75	224	546	374	68	272	483
Ноябрь (2) / November (2)	434	96	260	597	412	100	244	614
Декабрь (1) / December (1)	439	104	279	645	440	100	274	591
Декабрь (2) / December (2)	384	53	258	470	413	94	245	628

В указанных районах максимальная первичная продукция наблюдалась в период весеннего «цветения» во второй половине марта – первой половине апреля. По неосредненным данным, в указанные месяцы продуктивность в основном повышалась, но в отдельные годы «цветение» могло начинаться с февраля. Также в холодный период (январь – март) в единичных случаях

встречались довольно высокие значения максимальных величин *PP*. Эти увеличения обусловлены главным образом высокими концентрациями хлорофилла *a*.

Второй выраженный максимум наблюдался в июле – августе. В диапазоне вариаций в этот период минимальные значения продукции держались на довольно высоком уровне, как и максимальные, хотя и ниже значений весеннего периода. Летний пик может быть связан с высокой скоростью ассимиляции, высокой температурой и освещенностью.

Появление слабого осеннего пика можно отметить в конце ноября – начале декабря, он вызван, по-видимому, усилением ветрового воздействия и осадков, способствующих увеличению конвективных потоков биогенных веществ в эвфотический слой в еще относительно теплой воде. После этого максимума с наступлением периода минимальной освещенности и понижения температуры воды происходило кратковременное снижение первичной продукции. С января интегральная первичная продукция начинала снова постепенно повышаться.

Согласно осредненным данным, в восточном районе зимние значения интегральной первичной продукции до начала весеннего «цветения» выше, чем в западном; с апреля, наоборот, в западном районе средняя продуктивность выше, несмотря на синхронное снижение средних величин до минимальных значений в мае – начале июня. До начала августа в западном глубоководном районе моря значения средней интегральной продукции несколько выше, чем в восточном. В конце августа – сентябре наблюдается более заметное увеличение в восточном районе, после чего продуктивность в столбе воды изменяется приблизительно одинаково в двух районах. Однако если рассматривать ежегодную динамику по двухнедельным данным, можно отметить, что в масштабах осредняемых акваторий закономерные смены зон с высокой продукцией явно не прослеживаются. В западной области средне-годовые величины незначительно выше, чем в восточной, но в целом в течение года в указанных районах продукционные показатели изменяются приблизительно одинаково.

Таким образом, годовой цикл первичной продукции в столбе воды по осредненным двухнедельным данным за 1998–2015 гг. имеет два характерных максимума – зимне-весенний и летний, а также третий – слабый осенний. При этом динамика величин в различные годы может меняться, несколько смещая основные пики максимумов и минимумов по срокам и длительности. А также в редких случаях в зависимости от комплексного влияния факторов в столбе воды могут проявляться не характерные пики или минимумы в динамике продуктивности.

Была проведена оценка трендов интегральной первичной продукции по регулярным двухнедельным данным за 18 лет. Выборка таких данных соответствует нормальному распределению (согласно критерию Шапиро-Уилка). Анализировался угол наклона линейной регрессии сезонного цикла продуктивности фитопланктона, и с помощью метода наименьших квадратов (МНК) были получены коэффициенты. Кроме того, определялись аномалии для каждого года как разность между средним за полмесяца значением и среднепогодным, а также коэффициенты регрессионных уравнений (табл. 2). Ис-

пользовались статистические показатели: критерий Фишера, критерий Стьюдента, уровень значимости ($p < 0,1$). По результатам проведенного анализа сезонных вариаций по двухнедельным данным для глубоководной части Черного моря, а также по расчетам аномалий сезонных изменений интегральной первичной продукции за 18 лет статистически значимого тренда мы не обнаружили. На более коротких временных интервалах (1998–2008 гг.) при положительном наклоне линии регрессии статистически значимые тренды отсутствовали. Тенденция к снижению наблюдалась в двух районах после 2008 г. (при уровне значимости $p < 0,005$), что может быть связано с климатическими особенностями последних лет и теплыми зимами. Однако на общий тренд за 18-летний период это не повлияло.

Т а б л и ц а 2
Table 2

Коэффициенты линейной регрессии $y = c + ax$, статистические показатели для сезонных значений (PP), аномалий (PP_{an}) и изменений PP за 2009 – 2015 гг. (PP^*) при оценке тренда интегральной первичной продукции
Coefficients of linear regression $y = c + ax$, statistical indicators for the seasonal values (PP), anomalies (PP_{an}) and PP variations over 2009–2015 (PP^*) in assessing the trend of integral primary production

Тип данных / Type of data	c	a	SD_a	F	t	p
Район 1 / Region 1						
PP	438,6	-0,026	0,057	0,202	0,451	0,653
PP_{an} / PP_{an}	5,9	-0,027	0,041	0,452	0,672	0,502
PP^*	480,9	-0,630	0,214	8,664	2,943	0,004
Район 2 / Region 2						
PP	438,1	-0,040	0,051	0,609	0,780	0,436
PP_{an} / PP_{an}	9,0	-0,041	0,036	1,307	1,143	0,254
PP^*	480,0	-0,687	0,213	10,368	3,220	0,002

Пр и м е ч а н и е. SD_a – стандартное отклонение для коэффициента a ; F – критерий Фишера; t – критерий Стьюдента для коэффициента a ; p – вероятность.

Note. SD_a is a standard deviation for coefficient a ; F is the Fisher criterion; t is the Student criterion for coefficient a ; p is probability.

Таким образом, можно сделать вывод, что в 1998–2015 гг. в глубоководной зоне тренд интегральной первичной продукции не наблюдается. В период 1998–2008 гг. при слабой тенденции к повышению статистически значимый тренд отсутствовал. Снижение происходило преимущественно после 2008 г., что свидетельствует о чередовании недлительных циклов повышения и понижения продуктивности.

Обсуждение результатов

В сезонной динамике интегральной первичной продукции, описанной в ранних исследованиях, в глубоководных районах моря в феврале – апреле выделялся, как правило, зимне-весенний максимум [3, 4, 8, 17]. В зависимо-

сти от количества измерений и количества лет, включенных в осреднение, а также от масштаба участков исследуемой акватории средние величины изменялись приблизительно в диапазоне $500\text{--}750 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ [1, 3, 4]. По данным разрозненных измерений, проведенных в экспедициях в 1960–1991 гг., «цветение» отмечалось в феврале – марте. Однако в различные годы зимне-весеннее развитие фитопланктона происходило не одинаково. По данным [7, 10], в 80-е гг. повышение интегральной продукции достигало своего максимума в марте; согласно [8, 16], в 1998–2004 гг. по расчетным данным повышение происходило в марте – начале апреля. В исследованиях сезонной динамики развития биомассы фитопланктона указывался также период «цветения» в феврале – апреле [14, 24]. Биомасса фитопланктона имеет прямую связь с первичной продукцией, но при этом динамика биомассы фитопланктона, первичной продукции в поверхностном слое и интегральной первичной продукции может не совпадать, так как на каждый из показателей влияют еще дополнительные факторы. Позднезимний и весенний периоды «цветения» связывают с интенсивным развитием диатомовых водорослей [25].

По результатам моделирования и обобщения данных спутниковых наблюдений за 1998–2015 гг. (табл. 1) со второй половины марта до начала апреля отмечен весенний максимум интегральной продуктивности, составляющий в среднем $568\text{--}701 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$. Увеличение продуктивности по осредненным величинам наблюдалось также в январе и конце февраля, однако оно было ниже весеннего, так как зимние пики были не каждый год и возникали в зависимости от существенного возрастания концентрации хлорофилла *a*. Полученные величины продуктивности в столбе воды (табл. 1) для января близки к значениям ($350\text{--}430 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$), определенным радиоуглеродным методом в 70–90-х гг. [2, 4, 17], тогда как февральские средние значения, по нашим данным за 1998–2015 гг., были немного меньше. Минимум продуктивности в зоне фотосинтеза в мае – начале июня также согласуется с данными экспедиционных исследований *in situ* [4]. По осредненным данным, после 1998 г. он выше, чем в 80-х гг.

Согласно нашим данным, с июля до начала сентября наблюдается второй максимум интегральной продукции фитопланктона с наибольшими значениями в конце июля – августе. По результатам работ [4, 8, 16, 17] отмечалось повышение первичной продукции в летний период, связанное с «цветением» кокколитофорид и динофлагеллят, которое начиная с 90-х гг. стало более интенсивнее развиваться в центральной части моря [3]. Диапазон вариаций величин был сходным с нашими данными (табл. 1) за июнь – июль. Однако в августе – сентябре средние значения, по нашим расчетам ($565\text{--}437 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ соответственно), были выше приблизительно в 1,5 раза по сравнению с литературными данными [4], хотя по более поздним исследованиям, полученным расчетным путем, эта разница оказалась меньше [8, 16]. Каждый год рассмотренного периода летнее «цветение» происходило по-разному (изменяясь в диапазоне $294\text{--}683 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ в обоих районах), в отдельные годы оно могло практически отсутствовать в указанные месяцы. По некоторым данным [26, 27], начиная с 2000-х гг. в Черном море с июля по сентябрь наблюдалось интенсивное «цветение» диатомовых водорослей *Pseudosolenia calcaravis*, которые развиваются при низкой концентрации биогенных веществ.

Первичная продукция в столбе воды в летний период в большей степени определяется температурой и освещенностью, благодаря чему возникает второй максимум продуктивности при невысоких концентрациях хлорофилла *a*. Температурный градиент удерживает фитопланктонное сообщество в пределах эвфотической зоны. В связи с установившейся стратификацией в столбе воды количество питательных веществ, обеспечивающих продукцию фитопланктона, определяется в основном количеством веществ, которые остались после периода зимней конвекции. Они проникли из глубинных слоев моря и не были потреблены во время весеннего «цветения». Кроме того, первичная продукция фитопланктона может также определяться в этот период регенерационной продукцией, т. е. веществами, экскретируемыми гетеротрофными организмами. Поэтому максимумы и минимумы в диапазоне вариаций различаются незначительно, что можно видеть по небольшим стандартным отклонениям для указанных месяцев (табл. 1). Крайние максимальные значения величин продуктивности в летний период ниже зимних и весенних. Также следует допустить, что с 80–90-х гг. произошла перестройка фитопланктонного сообщества, вследствие чего годовая динамика интегральной первичной продукции несколько изменилась, в том числе в летний период.

Согласно осредненным данным за 18-летний период, во второй половине сентября – октябре наблюдалось снижение величин, а затем со второй половины ноября – незначительное возрастание, которое в других исследованиях выделяется как осенний максимум [4, 8, 16]. В осенний период также развивались преимущественно диатомовые водоросли и динофлагелляты [28]. Однако осенний максимум обычно длится недолго. В различные годы его можно наблюдать с первой половины ноября до первой половины декабря. Дальнейшее снижение продуктивных показателей происходит во второй половине декабря. Величины интегральной первичной продукции для октября – декабря, рассчитанные по адаптированной нами модели (1) и полученные в работах [1, 4, 8, 16], согласуются. В некоторых исследованиях указаны более низкие значения продуктивности в столбе воды для декабря [4], что может быть связано с особенностью процессов, протекающих в отдельные годы, и с количеством собранных данных, а также с областью осреднения. Спутниковые наблюдения позволяют регулярно проводить измерения с высокой плотностью покрытия, что проблематично делать в экспедициях. Также имеют значение области, на которых проводится осреднение данных, регулярность осредняемых данных и анализируемые годы. При сопоставлении все это влияет на различия полученных величин в разных исследованиях. Отсутствие экспедиционных исследований по интегральной первичной продукции за последние годы не позволяет объективно сравнить данные расчетов и измерений и ввести необходимые поправки для корректирования модели. Однако исследования, проведенные нами и опубликованные в работах [2, 4, 8, 16, 17], по своим оценкам близки между собой.

Среднегодовая величина за 18-летний период, по нашим расчетам с использованием спутниковых данных, для западного глубоководного района составляет $433,1 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, для восточного $429,5 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, т. е. $157\text{--}158 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Указанные величины продукции выше, чем в ранее приведенных исследованиях [1, 4, 5], но несколько ниже ($170\text{--}186 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$),

чем в исследованиях 1998–2004 гг. [16]. Можно предположить, что расчеты (табл. 1), проведенные по адаптированной для Черного моря модели, могут завышать первичную продукцию, так как не учитывается фотоингибирование скорости фотосинтеза фитопланктона. По результатам верификации использованной нами модели, завышение интегральной первичной продукции по сравнению с ее измеренными значениями возможно до 30% [13], по-видимому, преимущественно за счет завышения летом и ранней осенью. Исходя из того, что в столбе воды не было обнаружено достоверных положительных трендов продуктивности, следует, что за последние 18 лет первичная продукция не увеличилась. А в 2008–2015 гг. наблюдалось ее слабое снижение, приблизительно на $1 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ в каждом регионе за 7 лет. Поэтому полученные оценки первичной продукции могут быть сопоставимы с оценками из [14, 25] с учетом масштаба осредняемой акватории, плотности покрытия анализируемых измерений и способа определения величин интегральной продукции.

Так, например, при анализе спутниковых данных за 1998–2008 гг. [5] также не было выявлено достоверных трендов продуктивности в слое фотосинтеза, хотя характер вариаций первичной продукции был сходным. В указанном исследовании использовались другие области осреднения в глубоководной части моря, а глубина зоны фотосинтеза определялась по связи с концентрацией хлорофилла *a*, которая несколько занижала значения; остальные расчеты проводились по модели, применяемой нами в настоящей работе. Характер трендов в 1998–2008 гг. по новым расчетам был аналогичен предыдущему для указанных лет, тогда как средние величины продукции в столбе воды оказались выше. Использованное нами уравнение для расчета глубины зоны фотосинтеза, в которое входит коэффициент диффузного ослабления света, более точное. Вышеописанное подчеркивает важность масштабов осредняемых областей при сравнении и является одной из причин различий конечных средних значений. При анализе процессов, протекающих в экосистеме, и выявлении характерных тенденций важно также проводить оценки одним способом.

Анализ межгодовых вариаций и трендов интегральной первичной продукции свидетельствует о смене периодов возрастания и снижения показателей. В 80-х – начале 90-х гг. наблюдалось повышение продукционных характеристик [5, 9, 24], а с середины 90-х гг. – их спад. В период 1998–2008 гг. статистически значимые тренды отсутствовали, хотя намечалась тенденция к возрастанию интегральной первичной продукции, после 2008 г. началось ее снижение. Выявленные вариации связаны более всего с климатическими циклами, изменением температур и ветровым воздействием. Подобные циклы рассматривались в работе [29].

Сопоставляя западный и восточный глубоководные районы моря, необходимо отметить, что величины первичной продукции и их изменения находились приблизительно на одном уровне. Повышение средней за 18 лет интегральной продуктивности в январе – апреле в восточной части моря было более значительным, чем в западной, а в апреле – августе в западной части более значительным, чем в восточной, это согласуется с сезонным циклом географической циркуляции, рассчитанной по климатическим термохалинным

полям [30]. Такая смена периодов усиления западного и восточного циклонических круговоротов, вероятно, способствует усилению потока биогенных веществ с глубинных слоев моря и приводит к незначительному повышению продуктивности в столбе воды (табл. 1).

Заключение

По модельным расчетам с использованием спутниковых наблюдений оценены и впервые представлены ежемесячные, осредненные за двухнедельный период, величины интегральной первичной продукции для восточного и западного глубоководных районов Черного моря за 1998–2015 гг. Согласно осредненным данным за 18 лет, величины первичной продукции в столбе воды составляли $157\text{--}158 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ в двух районах. В сезонной динамике продуктивности наиболее значимыми являются зимне-весенний и летний максимумы, а также слабый осенний. Полученные значения хорошо согласуются с данными других исследований, проведенных ранее для иных временных интервалов. Статистически значимых трендов интегральной первичной продукции в глубоководной зоне за 18 лет не наблюдалось. Отмечены тенденции к снижению после 2008 г. Происходит чередование недлительных периодов повышения и понижения продукционных показателей. Усиление циклональных круговоротов, согласно сезонным циклам геострофических циркуляций, приводит к незначительному повышению средней интегральной первичной продукции в соответствующем районе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ведерников В. И., Демидов А. Б.* Первичная продукция и хлорофилл в глубоководных районах Черного моря // *Океанология*. 1993. Т. 33, № 2. С. 229–235.
2. *Ведерников В. И., Демидов А. Б.* Вертикальное распределение первичной продукции и хлорофилла в различные сезоны в глубоководных районах Черного моря // *Океанология*. 1997. Т. 37, № 3. С. 414–423.
3. *Ведерников В. И., Демидов А. Б.* Долговременная и сезонная изменчивость хлорофилла и первичной продукции в восточных районах Черного моря // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря* / Отв. ред. А. Г. Зацепин, М. В. Флинт. Москва : Наука, 2002. С. 212–247.
4. *Демидов А. Б.* Сезонная изменчивость и оценка годовых величин первичной продукции фитопланктона в Черном море // *Океанология*. 2008. Т. 48, № 5. С. 718–733.
5. *Ковалева И. В.* Межгодовые и сезонные изменения концентрации хлорофилла *a* и первичной продукции в глубоководной части Черного моря // *Гидробиологический журнал*. 2014. Т. 50, № 3. С. 38–50.
6. *Финенко З. З.* Первичная продукция Черного моря: экологические и физиологические характеристики фитопланктона // *Экология моря*. 2001. Вып. 57. С. 60–67.
7. *Финенко З. З., Суслин В. В., Чурилова Т. Я.* Оценка продуктивности фитопланктона Черного моря по спутниковым данным // *Доклады Академии наук*. 2010. Т. 432, № 6. С. 845–848.
8. *Финенко З. З., Суслин В. В., Чурилова Т. Я.* Региональная модель для расчета первичной продукции Черного моря с использованием данных спутникового сканера цвета SeaWiFS // *Морской экологический журнал*. 2009. Т. VIII, № 1. С. 81–106.
9. *Юнев О. А.* Эвтрофикация глубоководной части Черного моря: многолетние изменения годовой первичной продукции фитопланктона // *Системы контроля окружающей среды. Средства, информационные технологии и мониторинг*. Севастополь : НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2009. С. 407–413.

10. Long-term variations of surface chlorophyll a and primary production in the open Black Sea / O. A. Yunev [et al.] // *Marine Ecology Progress Series*. 2002. V. 230. P. 11–28. doi:10.3354/meps230011
11. *Agirbas E., Bakirci M.* Size-fractionated primary production in the south-eastern Black Sea // *Oceanologia*. 2022. Vol. 64, iss. 2. P. 244–266. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2021.11.002>
12. Первичная продукция Черного моря: спектральный подход / Т. Я. Чурилова [и др.] // *Морской биологический журнал*. 2016. Т. 1, № 3. С. 50–53. doi:10.21072/mbj.2016.01.3.08
13. *Ковалёва И. В.* Сравнение алгоритмов расчета первичной продукции Черного моря по концентрации хлорофилла в поверхностном слое, интенсивности солнечной радиации и температуре // *Морской экологический журнал*. 2010. Т. IX, № 2. С. 62–73.
14. *Финенко З. З., Чурилова Т. Я., Суслин В. В.* Оценка биомассы фитопланктона и первичной продукции в Черном море по спутниковым данным // *Промысловые биоресурсы Черного и Азовского морей* / Под ред. В. Н. Еремеева и др. Севастополь : НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. С. 221–236.
15. *Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z.* Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // *Journal of Marine Systems*. 2006. Vol. 60, iss. 3–4. P. 235–254. doi:10.1016/j.jmarsys.2005.11.011
16. *Юнев О. А.* Эвтрофикация и годовая первичная продукция фитопланктона глубоководной части Черного моря // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 4. С. 1–10.
17. Peculiarities of seasonal variability of primary production in the Black Sea / L. V. Stelmakh [et al.] // *Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea* / Eds. U. Ivanov, T. Oguz. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers. 1998. Vol. 1. P. 93–104.
18. *Суслин В. В., Чурилова Т. Я., Сосик Х. М.* Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла *a* в Черном море по спутниковым данным SeaWiFS // *Морской экологический журнал*. 2008. Т. VII, № 2. С. 24–42.
19. *Suslin V., Churilova T.* A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-*a* and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners // *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 37, iss. 18. P. 4380–4400. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350>
20. Концентрация хлорофилла *a* в Черном море: сравнение спутниковых алгоритмов / В. В. Суслин [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 64–72. doi:10.7868/S2073667318030085
21. *Behrenfeld M. J., Falkowski P. G.* A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models // *Limnology and Oceanography*. 1997. Vol. 42, iss. 7. P. 1479–1491.
22. *Suslin V. V., Slabakova V. K., Churilova T. Ya.* Diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance at 490 nm and its spectral characteristics in the Black Sea upper layer: modeling, *in situ* measurements and ocean color data // *Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104663H* (30 November 2017). 2017. <https://doi.org/10.1117/12.2287367>
23. *Суслин В. В., Чурилова Т. Я.* Упрощенный метод расчета спектрального диффузного коэффициента ослабления света в верхнем слое Черного моря на основе спутниковых данных // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2010. Вып. 22. С. 47–60.
24. *Кривенко О. В., Пархоменко А. В.* Пространственная и временная изменчивость биомассы фитопланктона в Черном море за период 1948–2000 гг. // *Морской экологический журнал*. 2010. Т. IX, № 4. С. 5–24.
25. *Финенко З. З., Крупаткина Д. К.* Первичная продукция в Черном море в зимне-весенний период // *Океанология*. 1993. Т. 33, № 1. С. 97–104.
26. Скорость роста фитопланктона и его выедание зоопланктоном в западной части Черного моря в осенний период / Л. В. Стельмах [и др.] // *Океанология*. 2009. Т. 49, № 1. С. 90–100.

27. *Брянцева Ю. В., Горбунов В. П.* Пространственное распределение основных параметров фитопланктона в северной части Черного моря // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2012. Вып. 7. С. 126–137.
28. The impact of physical processes on taxonomic composition, distribution and growth of phytoplankton in the open Black Sea / A. S. Mikaelyan [et al.] // Journal of Marine Systems. 2020. Vol. 208. 103368. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103368>
29. *Platt T.* Primary production of the ocean water column as a function of surface light intensity: algorithms for remote sensing // Deep Sea Research Part. A. Oceanographic Research Papers. 1986. Vol. 33. iss. 2. P. 149–163.
30. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. 212 с.

Об авторах:

Ковалёва Илона Васильевна, научный сотрудник, отдел экологической физиологии водорослей, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5430-2002**, **Scopus Author ID: 56405274600**, **WoS ResearcherID: AAB-4397-2019**, ila.82@mail.ru

Суслин Вячеслав Владимирович, ведущий научный сотрудник, руководитель отдела динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8627-7603**, **Scopus Author ID: 6603566261**, **ResearcherID: B-4994-2017**, **SPIN-код: 1681-7926** **AuthorID: 825673**, slava.suslin@mhi-ras.ru