

А. С. Хорунженко^{1✉}

Влияние силы Кориолиса на распространение цунами в Японском море

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.khorunzhenko@g.nsu.ru

Аннотация. Численно исследуется влияние силы Кориолиса на распространение цунами в Японском море методом Мак-Кормака на регулярной широтно-долготной сетке в сферических координатах. Корректность реализации кориолисова члена проверена в контролируемом сравнительном тесте на плоской волне «юг–север» (амплитуда 1 м, скорость течения в волне $\approx 0,099$ м/с, центральная широта 45°). диаграмма Ховмёллера u -компоненты скорости вдоль меридианной полосы в центре расчётной области показывает, что в расчёте без Кориолиса u остаётся на уровне численного шума, а в расчёте с Кориолисом за прохождением фронта волны накапливается положительная u -компонента $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ м/с, согласующаяся с теоретической оценкой $\Delta u = f \cdot v_0 \cdot T_{pulse}$. На сценарии с модельным эллипсоидным источником в южной части Японского моря пиковые прибрежные амплитуды отличаются в пределах 1–2 %, а поточечная синхронная разность поля свободной поверхности $\eta_{cor}(x, y, t) - \eta_{noCor}(x, y, t)$ в ближней зоне источника достигает 1,6 м. Расширенный анализ с тестом «запад–восток» и оценкой сходимости планируется в отдельной публикации.

Ключевые слова: цунами, уравнения мелкой воды, сила Кориолиса, схема Мак-Кормака, Японское море

A. S. Khorunzhenko^{1✉}

Impact of the coriolis force on tsunami propagation in the Japan Sea

¹Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.khorunzhenko@g.nsu.ru

Abstract. The impact of the Coriolis force on tsunami propagation in the Japan Sea is investigated numerically using a MacCormack shallow-water solver on a regular latitude-longitude grid in spherical coordinates. Correct implementation of the Coriolis term is verified in a controlled comparison test on a south-to-north plane wave (1 m amplitude, ≈ 0.099 m/s meridional velocity, central latitude 45° N). A Hovmöller diagram of the velocity component along the parallel (u -component) over a meridional strip in the centre of the computational domain shows that without Coriolis u remains at the level of numerical noise, whereas with Coriolis a positive u -component of about $2 \cdot 10^{-3}$ m/s accumulates behind the propagating wave front, in agreement with the theoretical estimate $\Delta u = f \cdot v_0 \cdot T_{pulse}$. For a model ellipsoidal source in the southern Japan Sea peak coastal amplitudes differ between the two runs by 1–2 %, while synchronous pointwise differences $\eta_{cor}(x, y, t) - \eta_{noCor}(x, y, t)$ of the free-surface field near the source reach 1.6 m. Extended analysis with a west–east test and convergence study is planned in a follow-up publication.

Keywords: tsunami, shallow-water equations, Coriolis force, MacCormack scheme, Japan Sea

Введение

Современные вычислительные системы позволяют проводить детальное численное моделирование распространения цунами практически в реальном времени [1, 2, 3]. При расчёте для крупных акваторий с мелким пространственным шагом возникают два вопроса: о вычислительных ресурсах и о том, какие члены уравнений мелкой воды существенны для достоверного описания распределения высот волн вдоль побережий. Эффект силы Кориолиса в открытом океане на малых временах часто полагается малым, однако для средне-высоких широт и характерных масштабов, сопоставимых с радиусом деформации Россби, его вклад становится количественно заметным [4, 5, 6]. Для Японского моря (широтный диапазон 33–53°) период инерции $\frac{2\pi}{f}$ на широте 45° составляет около 17 часов, а баротропный (внешний) радиус деформации Россби $R_d = \frac{c}{f}$ при средней глубине около 1 км – порядка 960 км, т. е. близок к характерному горизонтальному размеру самой акватории. Таким образом, для Японского моря оправдан целевой анализ вклада силы Кориолиса.

Цель настоящей работы – количественно исследовать влияние силы Кориолиса на распространение цунами в Японском море. Настоящая работа продолжает исследования автора и соавторов по численному моделированию цунами с помощью декомпозиции расчётной области на перекрывающиеся подобласти [7], что позволяет проводить вычислительные эксперименты на ресурсах персонального компьютера.

Методы и материалы

В качестве модели используются нелинейные уравнения мелкой воды [4, 5] с учётом силы Кориолиса в уравнениях импульса:

$$H(x, y, t) = \eta(x, y, t) + D(x, y), \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - f v = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + f u = 0. \quad (4)$$

Здесь H – полная толщина слоя воды; η – возмущение свободной поверхности; D – глубина (батиметрия); u , v – компоненты скорости потока воды (u – вдоль параллели, положительное на восток; v – вдоль меридиана, положительное на север); g – ускорение свободного падения; $f = 2\Omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса; Ω – угловая скорость вращения Земли (приблизительно $7,29 \cdot 10^{-5}$ рад/с); φ – широта. При переходе к сферическим координатам локальный шаг по долготе

(по оси восток–запад) дополнительно масштабируется множителем $\cos \varphi$, что учитывает сужение параллелей при удалении от экватора.

Для численного решения используется двухшаговая конечно-разностная схема Мак-Кормака [8] с промежуточным и полным временными слоями. Расчётная область делится на перекрывающиеся полосы (вертикальные или горизонтальные в зависимости от направления преобладающего переноса), как описано в предыдущей работе автора и соавторов [7]. На внешних границах во всех представленных расчётах используется условие свободного выхода волны (нулевой градиент полей по нормали к границе). Для сравнения постановок «с учётом Кориолиса» и «без учёта Кориолиса» в обоих расчётах используется одна и та же регулярная широтно-долготная сетка в сферических координатах, одинаковые шаги по пространству и времени, идентичные начальные и граничные условия; единственное различие – значение параметра f в уравнениях (3), (4). Все вычислительные эксперименты выполнены в оптимизированной сборке компилятора с включёнными оптимизациями на многоядерном процессоре общего назначения.

Результаты

1. Тестовый расчёт с плоской волной.

Расчётная сетка – 4500×3000 узлов с шагом 1 км по обоим направлениям, центральная широта 45° с.ш., постоянная глубина 1000 м. Для исключения угловых артефактов двумерной экстраполяции открытой границы анализ и визуализация проводятся в центральной зоне размером 2500×3000 км (центральные 2500 столбцов i из диапазона $[1000, 3500]$). Начальное возмущение – плоская волна высотой $\eta_0 = 1$ м, однородная по долготе, шириной 15 км по меридиану, с начальной скоростью течения в волне (v -компонентой, вдоль меридиана) $v_0 = +\frac{c\eta_0}{D} \approx +0,099$ м/с (плоская волна, бегущая на север). u -компонента скорости (вдоль параллели) в начальный момент равна нулю. Постановка плоской волны, однородной по долготе, не имеет поперечных краёв источника по долготе, что обеспечивает отсутствие краевых искажений во внутренней области интегрирования. На всех четырёх границах применяется условие свободного выхода волны (нулевой градиент по нормали), описанное в Методах. Шаг по времени $\tau = 5$ с, расчёт ведётся на протяжении 10 000 шагов по времени ($50\,000$ с ≈ 14 часов модельного времени, что соответствует приблизительно 0,8 инерционного периода $\frac{2\pi}{f} \approx 17$ часов на 45° с.ш.). Сохраняются покадровые снимки полей η , u , v каждые 125 шагов по времени (80 кадров за расчёт, шаг между снимками ≈ 10 мин), а также итоговые поля максимумов $\max \eta$, $\max |u|$, $\max |v|$, отслеживаемые на каждом шаге. Проведено два расчёта на одной и той же сетке: с учётом и без учёта силы Кориолиса.

Численные значения максимумов в обоих расчётах показывают, что пиковые величины амплитуды свободной поверхности $\eta_{\max}$ и максимумов модуля v -компоненты скорости (вдоль меридиана, юг–север) $\max |v|$ в расчётах с учётом и без учёта силы Кориолиса близки между собой: $\eta_{\max} \approx 1,234$ м с Кориолисом

и $\eta_{max} \approx 1,217$ м без него, $\max|v| \approx 0,12$ м/с в обоих (превышение η_{max} над начальной амплитудой $\eta_0 = 1$ м связано с численным overshoot — дисперсионными осцилляциями схемы Мак-Кормака на резком top-hat-фронте начального возмущения; $\max|v|$ согласуется с η_{max} через линейное соотношение $v \approx c \cdot \eta / D$). Сантиметровая разница η_{max} между двумя расчётами (0,017 м) находится на уровне этого численного overshoot и не интерпретируется как физический кориолисов сигнал в η . Для совместного представления пространственной и временной структуры u -компоненты используется диаграмма Ховмёллера [9] — двумерная карта поля «пространство–время», на которой одна ось — время, другая — пространственная координата (в данной работе t по горизонтали и j вдоль меридиана по вертикали при фиксированной долготе $i = 2250 \pm 10$; в литературе встречается и транспонированная ориентация). Цвет в каждой точке карты соответствует значению поля $u(j, t)$ в данном узле и в данный момент модельного времени; этот формат стандартен в метеорологии и физической океанографии для визуализации распространяющихся волновых сигналов и был введён Е. Хёвмёллером в 1949 г. На рис. 1 видно качественное различие в u -компоненте скорости (вдоль параллели, восток–запад) между двумя расчётами. В расчёте без Кориолиса u остаётся на уровне численного шума $\approx 3 \cdot 10^{-5}$ м/с по всей расчётной области; в расчёте с Кориолисом за прохождением фронта накапливается положительная u -компонента, выходящая на плато $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ м/с. Соотношение пиков $\max|u|$ между двумя расчётами составляет $\approx 75\times$ и согласуется по порядку с линейной оценкой $\Delta u = f \cdot v_0 \cdot T_{\text{pulse}} \approx 1,54 \cdot 10^{-3}$ м/с при ширине источника $L_y = 15$ км, $c \approx 99$ м/с, $f = 1,03 \cdot 10^{-4}$ с $^{-1}$, $v_0 = 0,099$ м/с ($T_{\text{pulse}} = L_y / c \approx 151$ с — время прохождения фронта через фиксированный узел сетки). Превышение наблюдаемого $\max|u| \approx 2,24 \cdot 10^{-3}$ м/с над оценкой в $\sim 1,45$ раза соответствует тому, что в численном решении пиковая v -компонента в волне выше формальной v_0 из-за того же дисперсионного overshoot, что и в η_{max} . Это даёт количественное подтверждение корректной реализации кориолисова члена и физически согласуется с теорией: для плоской волны, однородной по долготе, сила Кориолиса в первом порядке по малому параметру $\varepsilon = f \cdot T_{\text{pulse}} \approx 1,6 \cdot 10^{-2}$ генерирует только u -компоненту, а отклик в основной паре полей (η, v) распространяющегося импульса возникает лишь во втором порядке ($\varepsilon^2 \approx 2,4 \cdot 10^{-4}$, субмиллиметровый эффект для $\eta \sim 1$ м). В рассмотренной постановке используется f -плоскость с постоянным $f = f(45^\circ)$; влияние широтной изменчивости f (β -эффекта) в этом контролируемом тесте не анализировалось.

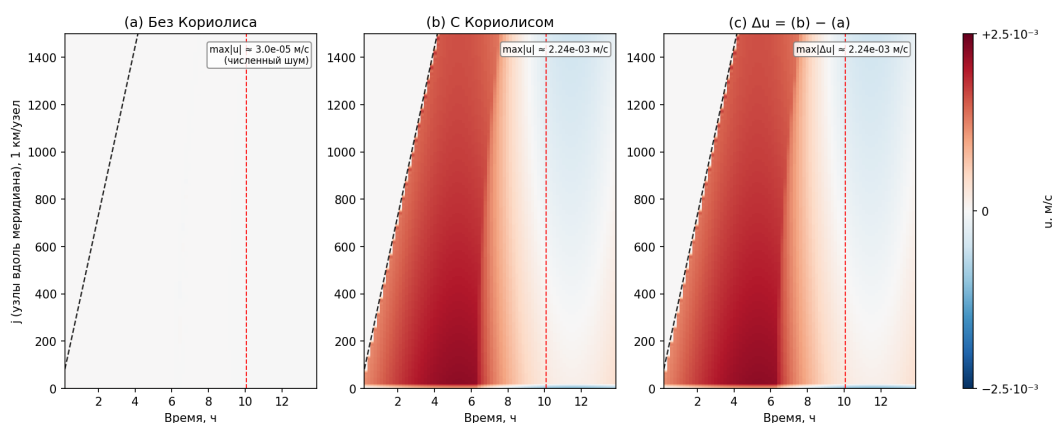


Рис. 1. Диаграмма Ховмёллера [9] $u(j, t)$ для центральной полосы $i = 2250 \pm 10$: (а) без Кориолиса, (б) с Кориолисом, (с) разность $\Delta u = (b) - (a)$.

Чёрная штриховая линия – положение переднего фронта $j_{\text{front}}(t) = 20 + c \cdot t / \Delta y$, $\Delta y = 1 \text{ км}$ – шаг сетки по меридиану, $c = \sqrt{g \cdot D} \approx 99 \text{ м/с}$. Красная штриховая вертикаль – момент $t = 10 \text{ ч}$. На каждой панели в правом верхнем углу указан $\max|u|$ по показанному фрагменту. Цветовая шкала $\pm 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ одинакова для всех трёх панелей.

2. Сценарий с модельным эллипсовидным источником в Японском море.

Расчётная область включает всё Японское море ($33,0^\circ$ – $53,0^\circ$ с.ш., $127,3^\circ$ – $142,3^\circ$ в.д.). Батиметрия взята из глобальной цифровой батиметрии GEBCO-2024 [10] с пространственным шагом $0,0041667^\circ$, что соответствует сетке 3601×4801 узлов. Шаг по времени $\tau = 0,5 \text{ с}$, всего 25 000 шагов ($\approx 3,5 \text{ ч}$ времени распространения волны). Модельный источник – эллипсовидное начальное поднятие свободной поверхности с амплитудой 2 м, полуосями $0,148^\circ$ и $0,449^\circ$ и ориентацией главной оси под углом -80° к меридиану; центр источника расположен в точке ($132,0^\circ$ в.д., $36,0^\circ$ с.ш.) – в глубоководной области южной части Японского моря, приблизительно в 100 км к северо-западу от префектуры Симане (о. Хонсю) и в 235 км к востоку от восточного побережья Корейского полуострова. Сценарий рассчитан дважды – с учётом и без учёта силы Кориолиса на одной и той же регулярной широтно-долготной сетке в сферических координатах (см. Методы).

Глобальные максимумы амплитуды сопоставимы: $\max \eta$ с учётом Кориолиса = 3,370 м, без учёта = 3,359 м. Таким образом, сила Кориолиса не меняет порядок пикового значения в ближней зоне источника, но перераспределяет энергию во времени и пространстве – поточечный максимум синхронной разности достигает 1,602 м. Основная локализация наблюдаемого отличия – ближняя зона источника.

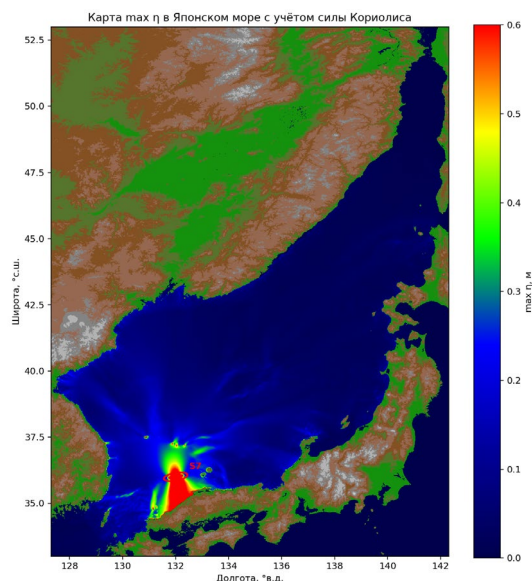


Рис. 2. Карта $\max \eta$ в Японском море с учётом силы Кориолиса. Шкала насыщена на 0,6 м; локальный пик вблизи источника 3,37 м.

3. Высоты вдоль побережий.

Для оценки влияния силы Кориолиса на максимальные высоты волны у побережий выбраны две контрольных линии: западное (со стороны Японского моря) побережье Хонсю вблизи модельного источника и Приморье от Владивостока до Рудной Пристани. Контрольные линии показаны на рис. 3. Распределения максимальных рассчитанных высот вдоль этих линий приведены на рис. 4, 5.

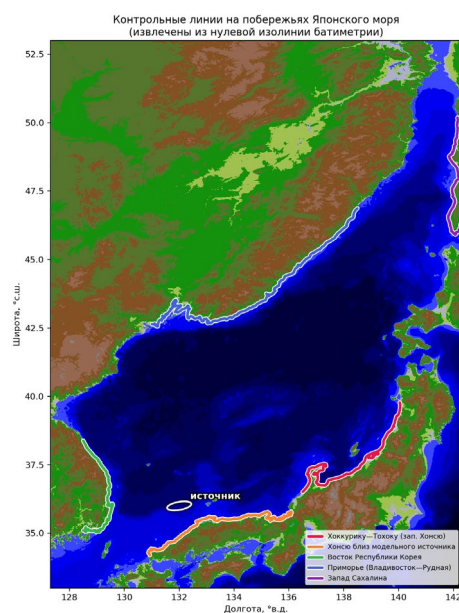


Рис. 3. Контрольные береговые линии и положение модельного источника (эллипс).

Сводная количественная картина такова. На обеих контрольных линиях пиковые рассчитанные высоты η_{max} , полученные с учётом и без учёта силы Кориолиса, отличаются в пределах 1–2 %: различия заключены в локальном перераспределении высоты, а не в систематическом усилении или ослаблении.

Максимум поточечной (вдоль линии) разности кривых достигает 0,15 м на линии «Хонсю вблизи модельного источника» и 0,02 м на линии Приморье. Физически наблюдаемая картина согласуется с теорией вращающегося океана: сила Кориолиса порождает поперечную (восточно-западную) компоненту скорости и приводит к фазовому и пространственному перераспределению поля волны, вследствие чего поточечная разность между расчётами существенна, но интегральный пиковый эффект при рассмотренных характеристиках источника и акватории оказывается небольшим.



Рис. 4. Распределения максимальных рассчитанных высот вдоль береговой линии Хонсю вблизи источника.

Верх – высоты с/без Кориолиса, низ – разность.



Рис. 5. Распределения максимальных рассчитанных высот вдоль двух береговой линии Приморья.

Верх – высоты с/без Кориолиса, низ – разность.

Обсуждение

Контролируемый тест плоской волны качественно согласуется с линейной теорией вращающегося океана. Теоретическая оценка $\Delta u = f \cdot v_0 \cdot T_{\text{pulse}}$, $T_{\text{pulse}} = L_y / c$ при $f = 1,03 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $v_0 = 0,099 \text{ м/с}$, $L_y = 15 \text{ км}$ и $c \approx 99 \text{ м/с}$ даёт наработанную u -компоненту (вдоль параллели) $\approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$, что согласуется по порядку величины с пиковым численным $\max|u| \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ в расчёте с Кориолисом и качественно подтверждает корректную реализацию кориолисова члена. Диаграмма Ховмёллера $u(j, t)$ наглядно демонстрирует пространственно-временную структуру сигнала: за прохождением волнового фронта u выходит на плато $\approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ в расчёте с Кориолисом, тогда как в расчёте без Кориолиса u остаётся на уровне численного шума $\approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$. На временах меньше инерционного периода ($\approx 17 \text{ ч}$ на 45° с.ш.) пиковые прибрежные высоты изменяются слабо: основной эффект – локальное перераспределение энергии во времени и пространстве. Сопоставимость радиуса деформации Россби с горизонтальным масштабом Японского моря (см. Введение) обуславливает заметное проявление силы Кориолиса именно для рассмотренной акватории.

Заключение

Проведено исследование влияния силы Кориолиса на распространение цунами в Японском море при использовании схемы Мак-Кормака на регулярной широтно-долготной сетке в сферических координатах с декомпозицией расчётной области на полосы. Корректность включения силы Кориолиса подтверждена контролируемым тестом с плоской волной, бегущей на север с начальной скоростью течения в волне (v -компонентой, вдоль меридиана) $v_0 = +0,099 \text{ м/с}$ при однородном по долготе источнике: пиковые величины η_{max} и $\max|v|$ в обоих расчётах близки между собой (разность η_{max} составляет около $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, что соответствует $\approx 1,4 \%$ от пикового значения), а $\max|u|$ резко различается: $\approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ с Кориолисом против $\approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ без него – соотношение порядка семидесяти, согласующееся с теоретической оценкой $\Delta u = f \cdot v_0 \cdot T_{\text{pulse}}$. Для сценария с модельным эллипсовидным источником в южной части Японского моря на временных масштабах, существенно меньших инерционного периода (около 17 часов на 45° с.ш.), при заданных характеристиках источника и батиметрии глобальные пиковые амплитуды изменяются незначительно (порядка трёх метров в обоих случаях), поточечная синхронная разность в ближней зоне источника достигает значений порядка полутора метров, а вдоль рассмотренных береговых линий пиковые рассчитанные высоты η_{max} отличаются в пределах одного-двух процентов. Таким образом, эффект силы Кориолиса на рассмотренных масштабах проявляется преимущественно как локальное перераспределение амплитуды во времени и пространстве, а не как систематическое усиление прибрежных пиков. Полученные количественные оценки относятся к рассмотренному масштабу акватории и заданным характеристикам источника и могут служить ориентиром при интерпретации численных расчётов: для задач, в которых существенна поточечная согласованность с наблюдаемой волной (верификация мареографов, синхронный мониторинг), вклад силы Кориолиса должен учитываться

в явном виде, особенно при модельных временах, сопоставимых с частью инерционного периода.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственных заданий Института автоматизации и электрометрии СО РАН (№ FWNG-2024-0014) и Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (№ FWNM-2025-0004).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Titov V. V., Gonzalez F. I. Implementation and testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) model. – Seattle : NOAA/Pacific Marine Environmental Laboratory, 1997. – NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112.
2. Wang X., Power W. L. COMCOT: a tsunami generation, propagation and run-up model. – Lower Hutt : GNS Science, 2011. — GNS Science Report 2011/43.
3. Shuto N., Goto C., Imamura F. Numerical simulation as a means of warning for near-field tsunamis // Coastal Engineering in Japan. – 1990. – Vol. 33. – No. 2. – P. 173-193.
4. Stoker J. J. Water Waves: The Mathematical Theory with Applications. – New York : Interscience Publishers, 1957.
5. Kowalik Z., Murty T. S. Numerical Modeling of Ocean Dynamics. – Singapore : World Scientific, 1993.
6. Pedlosky J. Geophysical Fluid Dynamics. –2nd ed. –New York : Springer-Verlag, 1987.
7. Khorunzhenko A., Lavrentiev M. M., Marchuk A. The tsunami wave calculation in large domains by grid decomposition // OCEANS 2025 –Brest : proceedings, Brest, 16–19 June 2025. – IEEE, 2025.
8. MacCormack R. W., Paullay A. J. Computational efficiency achieved by time splitting of finite-difference operators. – 1972. – AIAA Paper No. – 72-154.
9. Hovmöller E. The trough-and-ridge diagram // Tellus. –1949. –V. 1. – No. 2. –P. 62–66. – DOI: 10.3402/tellusa.v1i2.8498.
10. GEBCO Compilation Group. The GEBCO_2024 Grid: a continuous terrain model of the global oceans and land. –Liverpool : NERC EDS British Oceanographic Data Centre, 2024. –DOI: 10.5285/1c44ce99-0a0d-5f4f-e063-7086abc0ea0f.

© А. С. Хорунженко, 2026