Научная статья

УДК 551.465.53
EDN: AWOFGI

Исследование изменчивости расхода воды через пролив Ближний (Алеутские острова) по данным глобальных океанических реанализов

С. П. Худякова [1, 2, ✉], Т. В. Белоненко [1], М. В. Будянский [1, 2], М. Ю. Улейский [2]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия*
✉ *khydyakova.s@gmail.com*

Поступила в редакцию 04.06.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принята к публикации 10.09.2025.

Аннотация

Цель. Цель исследования – количественно уточнить характеристики водообмена через пролив Ближний (Алеутские острова) на основе современных океанологических реанализов, оценить сезонную и межгодовую изменчивость расхода воды и выявить ключевые факторы, влияющие на динамику вод в проливе.

Методы и результаты. Для количественной оценки водообмена через пролив Ближний использовались следующие методы: анализ данных *CMEMS* за 1993–2021 гг. для определения среднесуточного расхода воды через пролив и его сезонной изменчивости; сравнение двух продуктов *CMEMS*: океанического реанализа *GLORYS*12*V*1 (*DT*) и прогностического *GLOBAL_ANALYSISFORECAST* (*NRT*) в регионе исследования; сравнение оценок по данным *CMEMS* с японским (*JCOPE*2*M*) и американским (*GOFS* 3.1) реанализами в регионе исследования. В результате получено, что в отдельные годы среднесуточный расход воды из Тихого океана в Берингово море превышал 15 Св, в то время как в другие периоды наблюдался отток воды в обратном направлении, достигающий 5 Св. Зафиксирована выраженная сезонная изменчивость среднесуточного расхода, характеризующаяся максимальными значениями в зимний период и минимальными – в летний. Выявлены существенные расхождения между данными, полученными с использованием различных продуктов реанализа (*CMEMS, JCOPE*2*M, GOFS* 3.1).

Выводы. Оценки расхода и водообмена через пролив Ближний по четырем различным наборам данных существенно различаются, что отражает сложный характер локальной циркуляции, особенности которой различные реанализы воспроизводят по-разному, и указывает на необходимость дальнейших исследований с применением данных натурных наблюдений.

Ключевые слова: пролив Ближний, Алеутские острова, Берингово море, Тихий океан, расход воды, циркуляция, сезонная изменчивость, океанические реанализы

Благодарности: исследование выполнено при поддержке грантов Санкт-Петербургского университета № 129659573 и Российского научного фонда № 25-17-00021. Расчеты выполнены на высокопроизводительном вычислительном кластере Тихоокеанского океанологического института (государственное задание № 124022100072-5), программа «Фундаментальные принципы стратегий адаптации для развития Дальнего Востока России в условиях глобального изменения климата» ТОИ ДВО РАН.

Для цитирования: Исследование изменчивости расхода воды через пролив Ближний (Алеутские острова) по данным глобальных океанических реанализов / С. П. Худякова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 6. С. 749–766. EDN AWOFGI.

Original article

Investigation of the Volume Transport Variability through the Near Strait (Aleutian Islands) Based on Global Ocean Reanalyses

S. P. Khudyakova [1, 2, ✉], T. V. Belonenko [1], M. V. Budyansky [1, 2], M. Yu. Uleysky [2]

[1] *St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*
[2] *V. I. Ilyichov Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*
✉ *khydyakova.s@gmail.com*

Abstract
Purpose. The aim of the study is to specify the quantitative characteristics of water exchange through the Near Strait (Aleutian Islands) using the modern oceanographic reanalysis data, to assess the seasonal and interannual variability of water volume transfer, and to identify the key factors affecting water dynamics in the strait.
*Methods and Results***.** The following methods were applied to quantify water exchange through the Near Strait: 1) analysis of the *CMEMS* data (1993–2021) for determining daily average water volume transfer and its seasonal variability; 2) comparison of the data of two *CMEMS* products for the study region: *GLORYS*12*V*1 (*DT*) ocean reanalysis and *GLOBAL_ANALYSISFORECAST* (*NRT*) operational forecast; 3) comparison of the *CMEMS*-based estimates with those from the Japanese *JCOPE*2*M* and American *GOFS* 3.1 reanalyses for the above-mentioned area. The performed investigation made it possible to establish that during some years, the average daily water volume transfer from the Pacific Ocean into the Bering Sea exceeded 15 Sv (1 Sv = 10^6 m^3/s), whereas in other periods, the reverse water flow reaching up to 5 Sv was observed. A pronounced seasonal variability in the daily water transfer, namely its maximum values in winter and minimum ones in summer, was revealed. Significant discrepancies between the data derived from different reanalysis products (*CMEMS*, *JCOPE*2*M*, and *GOFS* 3.1) were identified.
Conclusions. The estimates of water volume transfer and exchange through the Near Strait derived from four different datasets show substantial variations indicating a complex nature of local circulation. Therefore different reanalyses reproduce its features in different ways. The obtained results point out the need for further research using field observations.

Keywords: Near Strait, Aleutian Islands, Bering Sea, Pacific Ocean, volume transport, circulation, seasonal variability, oceanic reanalysis

Acknowledgments: The study was supported by the St. Petersburg State University grant No. 129659573 and the Russian Science Foundation grant No. 25-17-00021. The calculations were carried out at the high-performance computing cluster of V. I. Ilyichov Pacific Oceanological Institute, FEB RAS (state assignment No. 124022100072-5) within the framework of research program "Fundamental principles of adaptation strategies for the development of Russian Far East in the context of global climate change" (POI FEB RAS).

For citation: Khudyakova, S.P., Belonenko, T.V., Budyansky, M.V. and Uleysky, V.Yu., 2025. Investigation of the Variability of Water Volume Transport through the Near Strait (Aleutian Islands) Based on Global Ocean Reanalyses Data. *Physical Oceanography*, 32(6), pp. 771-787.

Введение

Водообмен через проливы Алеутских о-вов представляет особый интерес для исследователей, поскольку архипелаг выступает естественной границей между Беринговым морем и северной частью Тихого океана. К югу от Алеутских о-вов расположено струйное Аляскинское течение, которое движется на

запад вдоль архипелага и продолжается в виде Северного Алеутского склонового течения [1]. Согласно исследованиям, около половины потока Аляскинского течения проникает в Берингово море через самые глубокие проливы архипелага – Амукта, Амчитка и Ближний [2], через которые транспортируются тепло, соль и биогены. Восточные проливы архипелага мелководные и узкие, тогда как западные, напротив, отличаются большей глубиной и шириной [3].

Согласно исследованию [4], в проливах Алеутской гряды выделяют три типа циркуляции: в мелководных проливах (Берингов, Унимак) преобладают направленные на север баротропные течения; в широких проливах (Ближний, Амукта, Булдырь) наблюдается сложная структура течений, обусловленная мезомасштабными вихрями; в глубоких проливах (Амчитка, Камчатский) регистрируются постоянные глубинные противотечения, противоположные основным поверхностным потокам и не зависимые от местных ветров.

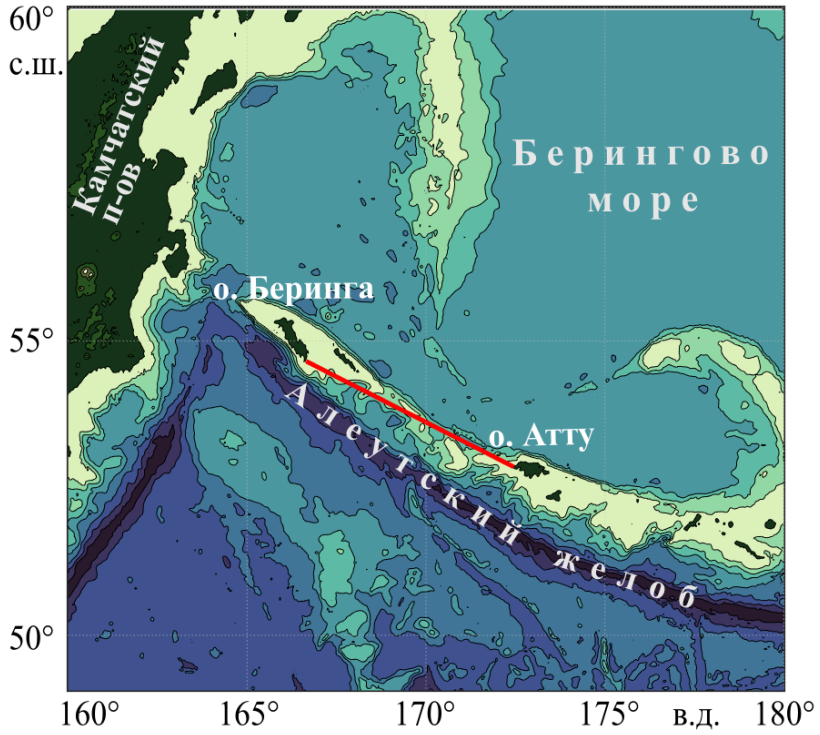
Пролив Самалга разделяет воды Алеутского архипелага как минимум на два экологически различных региона, что может способствовать пространственному разделению некоторых промысловых видов рыб [5, 6]. Восточнее пролива наблюдается влияние прибрежного течения Аляска, которое приносит теплую менее соленую воду с высокой концентрацией хлорофилла *a*. Западнее пролива преобладают более холодные соленые воды Аляскинского течения с низкой концентрацией хлорофилла *a*.

Избыток биогенов при низком хлорофилле *a* в этом регионе также подтверждается другими исследованиями. Например, циклоническое течение в северо-западной части Тихого океана (Западный субарктический круговорот) известно как зона с высокой концентрацией питательных веществ, но низким содержанием хлорофилла *a* [7]. Важную роль играет распределение растворенного железа, транспорт которого через Тихий океан определяется преимущественно горизонтальным перемешиванием и адвекцией [8].

В глубоководных районах концентрация хлорофилла *a* может увеличиваться локально из-за переноса воды из зоны материкового склона или свала глубин у Алеутских о-вов [9]. Кроме того, установлена значительная корреляция между уровнем хлорофилла *a* в районе Аляскинского течения и восточной части Берингова моря в августе – сентябре и интенсивностью ветра в северной части Тихого океана в ноябре – марте [10].

Пролив Ближний между о-вами Беринга и Атту в западной части Алеутского архипелага является самым широким в этой системе (рис. 1). По данным работ [11, 12], через него осуществляется основной перенос вод Аляскинского течения в Берингово море (6–12 Св). В сентябре 1992 г. транспорт через пролив Ближний был оценен в ~ 5 Св [13].

Обычно воды Аляскинского течения проникают в Берингово море через пролив Ближний в северном направлении [5]. Однако в ряде случаев наблюдаются аномалии циркуляции, когда приток прекращается. Первое подобное явление было зафиксировано в 1990 г. [13]. Аляскинское течение отклонялось к югу от о. Атту, затем поворачивало на восток, а пролив Ближний оставался без притока более года. Это явление началось летом 1990 г. и продолжалось до конца 1991 г.



Р и с. 1. Пролив Ближний (красная линия) на карте глубин *GEBCO*_2021
F i g. 1. Near Strait (red line) on the *GEBCO*_2021 depth chart

Таким образом, несмотря на постоянные течения, поверхностная циркуляция в проливах Алеутской гряды характеризуется высокой пространственной и временной изменчивостью, что может существенно влиять на водообмен между Беринговым морем и Тихим океаном.

Многие натурные измерения в проливах Алеутской гряды выполнены в ходе американских и советско-американских экспедиций [1, 11, 13–15]. Установлено, что направление течения в различных частях пролива Ближний может различаться. В восточной части пролива наблюдалось южное течение (с севера на юг), вблизи о. Атту – юго-восточное, в западной части течение имело северное направление с затоком воды (*inflow*), оцениваемым в ~ 5 Св. В восточной части пролива фиксировался вынос воды (*outflow*) (–2 Св) [14].

Численное моделирование также выявляет высокую межгодовую изменчивость водообмена в западных проливах Алеутской гряды (Булдырь, Ближний, Камчатский) [16]. Бóльшая часть этой изменчивости объясняется наличием меандров и мезомасштабных вихрей, которые вызывают периодические изменения направления течения [17, 18].

Согласно результатам моделирования из работы [16], за 1979–2004 гг. расход воды через пролив Ближний составил от –9,5 до 18,3 Св. Поток, направленный на север, неоднократно приближался к нулю и менял направление 7 раз с продолжительностью таких периодов от трех месяцев до двух лет под влия-

нием вихрей и меандров с обеих сторон пролива. Разворот направления течения, вероятно, определяется положением мезомасштабных вихрей относительно оси пролива. Это указывает на то, что краткосрочные наблюдения (временны́е интервалы от нескольких месяцев до нескольких лет) могут быть недостаточны для точной оценки среднего расхода воды.

Несмотря на немалый объем публикаций, посвященных оценке расходов воды через проливы Алеутской гряды, их бóльшая часть не затрагивает измерения в XXI в. и не раскрывает механизмы изменения направления течения в проливе Ближний. В то же время изучение условий и факторов, влияющих на течение, представляет собой важное направление для понимания не только локальной экосистемы, но и более широких океанических и климатических процессов. Дистанционное зондирование, численное моделирование и данные буев с современными датчиками [4, 16, 19] используются при получении текущих оценок расхода воды в проливе, что обеспечивает более полное представление о динамике водообмена в данном регионе.

Цель исследования – уточнить оценки расхода и водообмена через пролив Ближний на основе современных наборов данных, проанализировать их сезонную и межгодовую изменчивость и выявить влияние на динамику водных масс мезомасштабных вихрей, атмосферного форсинга, крупномасштабных течений и других факторов.

Используемые данные

В работе использованы данные портала *Copernicus Marine Data Store*:

– продукт *Delayed Time* (*DT*) – океанический реанализ *GLORYS*12*V*1 (*Global Ocean Physics Reanalysis*, https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030);

– продукт *Near Real Time* (*NRT*) – прогностический продукт оперативной системы анализа и прогнозирования Мирового океана *GLOBAL_ANALYSISFORECAST* (*Global Ocean Physics Analysis and Forecast*, https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024).

Продукт *GLORYS*12*V*1 основан на глобальной системе прогнозирования *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (*CMEMS*) и охватывает данные спутниковой альтиметрии с 1993 г. Выходные данные отображаются на стандартной регулярной сетке с пространственным разрешением 1/12° (~ 8 км) на 50 стандартных уровнях. Наблюдения ассимилируются с помощью фильтра Калмана пониженного порядка (*SEEK*) с дополнительной коррекцией систематических ошибок температуры и солености (3*D-Var T*/*S bias correction*). Ассимилируемые данные включают в себя температуру поверхности моря, концентрацию морского льда и профили температуры и солености.

В отличие от *DT* прогноз в *NRT* выполнен с усвоением данных за период, очень близкий к настоящему, при этом доступных наблюдений меньше и они менее точны, чем в реанализе *DT*. Период обновления прогноза составляет одни сутки, с учетом ассимиляции – одну неделю. Временно́е перекрытие двух продуктов составляет полгода и включает в себя период 1 января – 30 июня 2021 г. Для анализа использовались зональная (u) и меридиональная (v) компоненты скорости течения, рассчитанные на 50 доступных горизонтах в период с 1 января 1993 г. по 30 июня 2021 г. с временно́й дискретностью одни сутки.

Следует отметить отличия в донной топографии, используемой в *CMEMS* и представленной на генеральной батиметрической карте океанов (*The General Bathymetric Chart of the Oceans*, *GEBCO*, https://www.gebco.net/data_and_products/). В частности, согласно продуктам *DT* и *NRT*, в проливе Ближний присутствуют подводные возвышенности, которые отсутствуют в донной топографии *GEBCO*, при этом разница глубин может составлять 800–2500 м и более (167,6° и 170,9° в. д.). Эти отличия видны на рис. 5 (см. рис. 5 на с. 760). Мы использовали версию *GEBCO*_2021, поскольку она являлась на момент проведения исследования наиболее актуальной глобальной батиметрической компиляцией, созданной на основе объединения данных гидрографических служб, результатов многолучевых промеров и спутниковых альтиметрических измерений.

Для сопоставления с данными продуктов *CMEMS* были использованы реанализы *JCOPE*2*M* и *GOFS* 3.1.

Японский продукт *JCOPE*2*M* (https://www.jamstec.go.jp/jcope/htdocs/e/distribution/index.html), разработанный Японским агентством по науке и технологиям в области морских и геологических исследований (*Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*, *JAMSTEC*), представляет собой океанический реанализ высокого горизонтального разрешения 1/12°, созданный для описания изменчивости Куросио – Ойясио и мезомасштабной динамики района [20]. Продукт *JCOPE*2*M* – это обновленная версия реанализа *JCOPE*2, в которой используется метод 3*D-Var* ассимиляции океанических параметров и охватывается период с января 1993 г. по настоящее время.

Гибридная координатная модель океана *The Hybrid Coordinate Ocean Model* (*HYCOM*, https://www.hycom.org/hycom) представляет собой систему моделирования общей циркуляции океана с открытым исходным кодом. С 2003 г. данные *GOFS* 3.1 для глобального океана предоставляются пользователям в режиме онлайн с пространственным разрешением 0,08°. Вертикальные уровни в этой системе представлены с использованием гибридной координаты, которая является изопикнической в открытом стратифицированном океане и плавно переходит в координату, соответствующую рельефу в мелководных прибрежных районах, а также в координаты z-уровня в морях с перемешанным слоем и/или без стратификации.

В работе также использованы метеорологические данные атмосферного реанализа *ERA*5: зональная и меридиональная компоненты вектора скорости ветра на уровне 10 м, давление над уровнем моря (https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels); *ERA*5 – это пятое поколение глобального атмосферного реанализа (вместо *ERA-Interim*), подготовленное Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF*) и охватывающее период с 1940 г. по настоящее время. Продукт предоставляет ежечасные данные по широкому спектру параметров атмосферы, а также состояния поверхности суши и моря. Пространственное разрешение составляет 0,25° × 0,25°.

Для получения траекторий центров вихрей был использован Атлас мезомасштабных вихрей *META*3.2 *DT*, доступный на французском портале *Archiving*, *Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data* (*AVISO*). Вихри идентифицируются на картах абсолютной динамической топографии

(*Absolute Dynamic Topography*, *ADT*), рассчитанных с использованием доступных спутников и распространяемых морской службой *Copernicus*. Продукт *META*3.2 *DT*, основанный на использовании альтиметрии, предоставляет траектории антициклонических и циклонических вихрей с периодами жизни более и менее 10 сут (https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/value-added-products/global-mesoscale-eddy-trajectory-product/meta3-2-dt.html).

Методы

Расчет расхода через пролив Ближний проводился путем получения компонент скорости течения, нормальных к оси пролива, и их интерполяции в соответствующие точки. Для этого была выполнена трансформация исходной системы координат (x, y), где ось x направлена на восток, ось y – на север. На первом этапе вычислялись компоненты скорости течения, перпендикулярные оси пролива, с использованием методов, предложенных в работе [20]. Для этого применялись формулы поворота осей координат

$$U = u\ \cos\theta - v\ \sin\theta,$$

$$V = u\ \sin\theta + v\ \cos\theta,$$

где u, v – зональная и меридиональная компоненты скорости течения; θ – угол между параллелью и осью пролива.

Значения меридиональной компоненты скорости вдоль оси пролива получены в каждой точке на 50 горизонтах с использованием билинейной пространственной интерполяции. Для оценки объема воды, проходящего в северном направлении (Q_+) из океана в Берингово море (заток) и в южном, обратном (вынос), направлении (Q_-), используются следующие выражения:

$$Q_+ = \iint_{X_1 Z_0}^{X_2 Z_b} V_+(x,z)dzdx,$$

$$Q_- = \iint_{X_1 Z_0}^{X_2 Z_b} V_-(x,z)dzdx,$$

где V_+ и V_- – положительные и отрицательные значения меридиональной компоненты скорости; X_1 и X_2 – горизонтальные границы разреза; Z_0 и Z_b – нижний и верхний пределы интегрирования по вертикали; ось z направлена вверх.

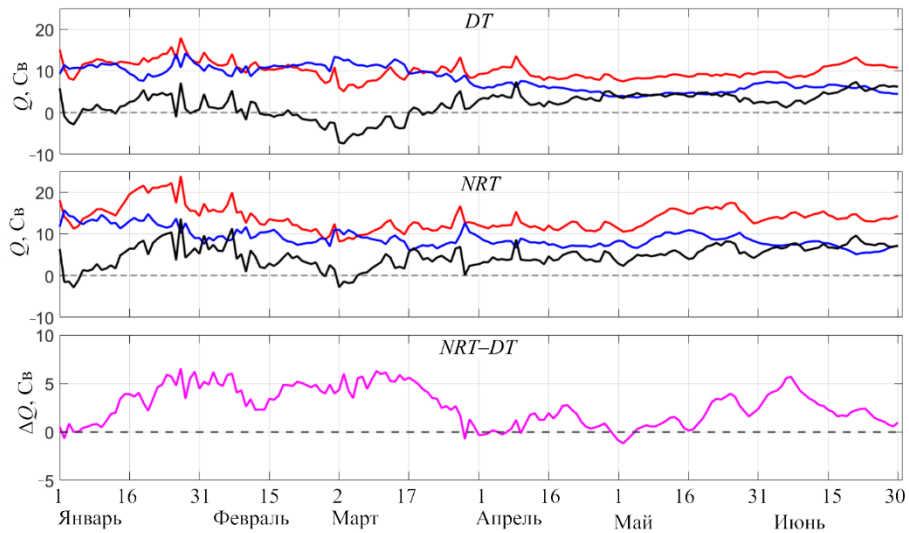
Расход воды (*volume transport*) Q определим как $Q = Q_+ - |\mathbf{Q}_-|$, водообмен (*water exchange*) F через пролив как $F = Q_+ + |\mathbf{Q}_-|$.

Результаты

Сравнение продуктов *CMEMS*. Проанализируем расход, заток и вынос воды через пролив Ближний на основе данных *DT* и *NRT* в период их перекрытия в первом полугодии 2021 г. Продукт *NRT* демонстрирует значительно бóльшие значения расхода, чем *DT*, на большинстве временных отрезков (рис. 2). Максимальный заток, зафиксированный в январе по данным *NRT*, достигает почти 24 Св, в то время как по данным *DT* он не превышает

18 Св. Наибольшие флуктуации всех расчетных параметров (заток, вынос и расход воды) наблюдаются в холодный период года, причем в прогностическом продукте *NRT* амплитуды этих колебаний значительно выше. Особое внимание привлекают два эпизода отрицательного расхода, когда вынос воды в Тихий океан превосходил заток в Берингово море. Переход расхода через ноль в начале года (2–4 января) зафиксирован в обоих продуктах, что свидетельствует о сходных тенденциях в моделях. Второй эпизод демонстрирует значительные различия в продолжительности выноса воды: расход принимает отрицательные значения с 20 февраля по 17 марта 2021 г. по данным *DT* и с 1 по 5 марта 2021 г. по данным *NRT*.

Нижний график на рис. 2 (сиреневая линия) иллюстрирует разницу (ΔQ) в расходе между продуктами *NRT* и *DT*, при этом расход, рассчитанный по данным реанализа *DT*, вычитается из расхода по прогностическому продукту *NRT*, так как второй превышает первый. На протяжении периода 1 января – 30 июня 2021 г. временной ход ΔQ демонстрирует значительную изменчивость – от –1,1 Св (2 мая) до 6,5 Св (27 января). Наибольшие различия в расходах, превышающие 5 Св, наблюдаются в конце января – начале февраля, в марте и начале июня. Разница между продуктами минимальна в весенний период (с конца марта по середину мая), что свидетельствует о высокой согласованности моделей и минимальной разнице в значениях скорости течений в данный период. Вероятно, это связано с пониженными значениями скорости в этот промежуток времени, когда акватория не подвергалась воздействию атмосферных циклонов и динамическая активность течений была низкой. Весной также фиксируются отдельные эпизоды, когда расход по реанализу *DT* слегка превосходил расход по прогностическому продукту *NRT*, при этом максимальная разница была зафиксирована в начале мая и составила –1,1 Св.

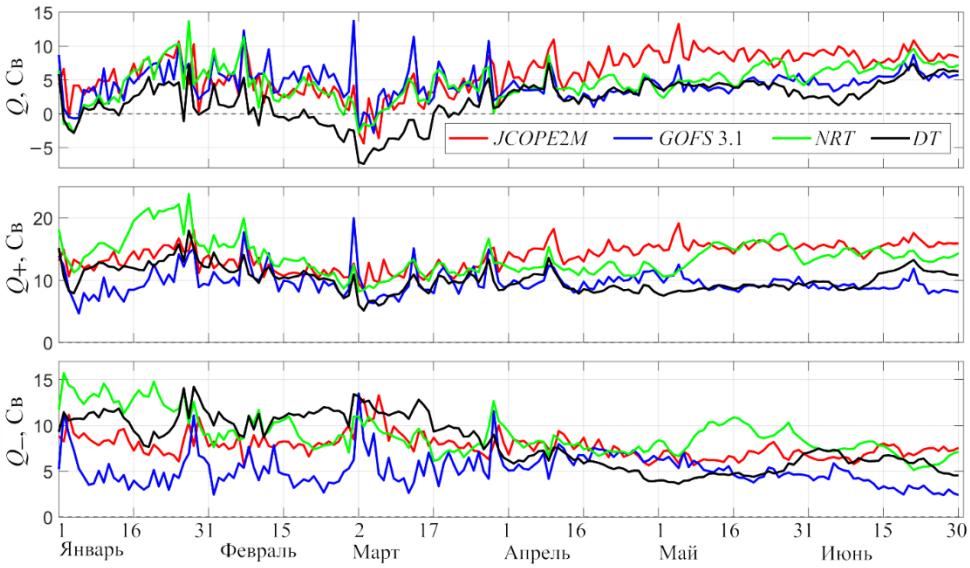


Р и с. 2. Расход Q (черная линия), заток Q_+ (красная) и вынос воды Q_- (синяя) через пролив Ближний по данным *GLORYS*12*V*1 (*DT*) и *GLOBAL_ANALYSISFORECAST* (*NRT*) и разность расходов (сиреневая линия) за период 1 января – 30 июня 2021 г.

F i g. 2. Volume transport Q (black line), inflow Q_+ (red line) and outflow Q_- (blue line) through the Near Strait based on the *GLORYS*12*V*1 (*DT*) and *GLOBAL_ANALYSISFORECAST* (*NRT*) data, and transport difference (lilac line) for the period 01.01.2021–30.06.2021

Обратим внимание на численные оценки различий двух продуктов, осредненные за рассматриваемый период. Среднесуточный расход, осредненный за первое полугодие 2021 г., по данным океанического реанализа составил 2 Св, в то время как по данным прогностического продукта он в два раза превышает расход по данным *DT* и равен 4,7 Св (таблица). Водообмен, рассчитанный по двум продуктам, в целом сопоставим и не имеет значительных различий, однако *NRT* демонстрирует более высокие значения (22,8 Св) по сравнению с реанализом (18,2 Св).

Сравнение расхода воды и водообмена в проливе Ближний по данным *DT*, *NRT*, *JCOPE2M* и *GOFS* 3.1. На рис. 3 показан расход воды, заток и вынос через пролив Ближний на основании указанных массивов. Период рассмотрения (первое полугодие 2021 г.) выбран с учетом перекрытия дат для двух продуктов *CMEMS*. Ниже выделены основные черты, отражающие как сходства, так и различия между продуктами.

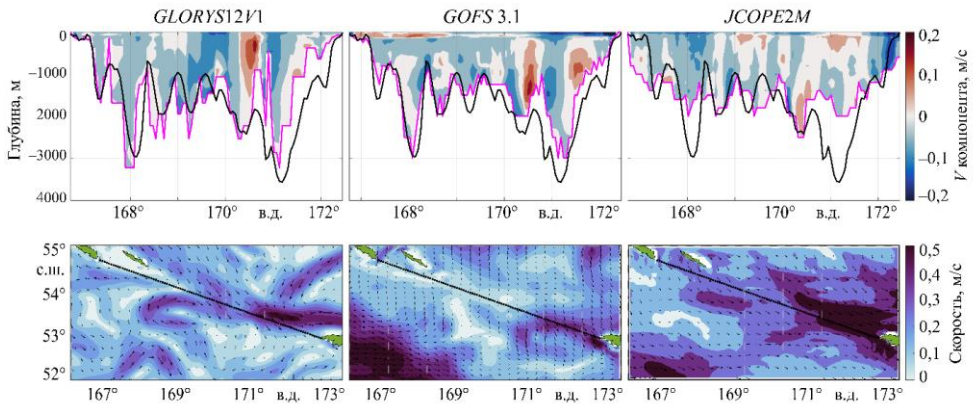


Р и с. 3. Расход Q, заток Q_+ и вынос воды Q_- через пролив Ближний по данным *JCOPE2M*, *GOFS* 3.1, *NRT*, *DT* за период 1 января – 30 июня 2021 г.
F i g. 3. Volume transport Q, inflow Q_+ and outflow Q_- through the Near Strait based on the *JCOPE2M*, *GOFS* 3.1 and *NRT*, *DT* data for the period 01.01.2021–30.06.2021

Расход воды на рассмотренном промежутке меняется синфазно: формы кривых сопоставимы и переход через ноль воспроизводится по всем четырем наборам данных. В марте наблюдается заметное расхождение оценок: в частности, расход воды по данным *DT* составляет –7,4 Св, в то время как по данным остальных продуктов он не превышает –5 Св. Отметим, что 2 марта все четыре продукта одновременно демонстрируют отрицательный расход воды, что указывает на преобладание выноса из Берингова моря в Тихий океан. Однако в период с начала апреля до конца июня модель *JCOPE2M* завышает значения расхода воды по сравнению с другими наборами данных: наибольшее отклонение *JCOPE2M* наблюдается в начале мая, когда расход воды составил

> 13 Св, тогда как другие наборы данных показывают значения, не превышающие 5–7 Св. Кроме того, в период с февраля по апрель данные *GOFS* 3.1 демонстрируют выбивающиеся из общего ряда значения расхода воды, особенно заметные «пики», например 1 и 15 марта.

Поле скоростей, полученное по данным продуктов *DT*, *GOFS* 3.1 и *JCOPE2M*, демонстрирует значительные различия. На рис. 4 видно, что антициклонический вихрь, расположенный к югу от оси пролива Ближний, обнаруживается только в продукте *DT*, в то время как в данных *JCOPE2M* и *GOFS* 3.1 его нет в поверхностном слое. Во всех продуктах фиксируется усиление течения в восточной части пролива, у о. Атту. Однако по данным *JCOPE2M* и *GOFS* 3.1 в юго-западной части области наблюдаются скорости > 0,5 м/с, что не зафиксировано в поле скорости *DT*.



Р и с. 4. Вертикальный разрез нормальной компоненты скорости (*V*) через пролив Ближний (вверху) и модуль скорости на поверхности (внизу) по данным *GLORYS*12*V*1 (*DT*), *GOFS* 3.1 и *JCOPE2M* 02.03.2021 г. (черная линия – батиметрия *GEBCO*_2021, сиреневая линия – модельная батиметрия)

F i g. 4. Vertical section of the normal velocity component (*V*) through the Near Strait (above) and surface velocity field (below) based on the *GLORYS*12*V*1 (*DT*), *GOFS* 3.1 and *JCOPE2M* data on 02.03.2021 (black line indicates the *GEBCO*_2021 bathymetry, and lilac line – the model bathymetry)

Сравнение среднего расхода воды и водообмена за период 1 января – 30 июня 2021 г. по данным четырех продуктов позволяет выделить как сходства, так и различия. Расход воды по данным *JCOPE2M* (6,2 Св) оказался наибольшим, превышая расходы, полученные по данным всех остальных массивов. Однако водообмен по данным *JCOPE2M* (21,6 Св) оказался меньше по сравнению с *NRT* (22,8 Св). В то же время расход воды по данным *GOFS* 3.1 (4,5 Св) близок к значению *NRT* (4,7 Св). Наименьший расход воды зафиксирован по данным *DT* (2,0 Св), что в два раза меньше, чем по *NRT* и *GOFS* 3.1, и в три раза меньше, чем по *JCOPE2M*. Водообмен, в свою очередь, оказался минимальным по данным *GOFS* 3.1 (14,8 Св), затем следует увеличение значений: *DT* (18,2 Св), *JCOPE2M* (21,6 Св) и *NRT* (22,8 Св).

Расход (*Q*) и водообмен (*F*) по данным *DT*, *NRT*, *JCOPE2M* и *GOFS* 3.1, осредненным за период 1 января – 30 июня 2021 г.
Volume transport (*Q*) and water exchange (*F*) based on the *DT*, *NRT*, *JCOPE2M* and *GOFS* 3.1 data averaged over the period 01.01.2021–30.06.2021

Параметры, Св / Parameters, Sv	Продукт / Product			
	DT	*NRT*	*JCOPE2M*	*GOFS* 3.1
Q	2,0	4,7	6,2	4,5
F	18,2	22,8	21,6	14,8

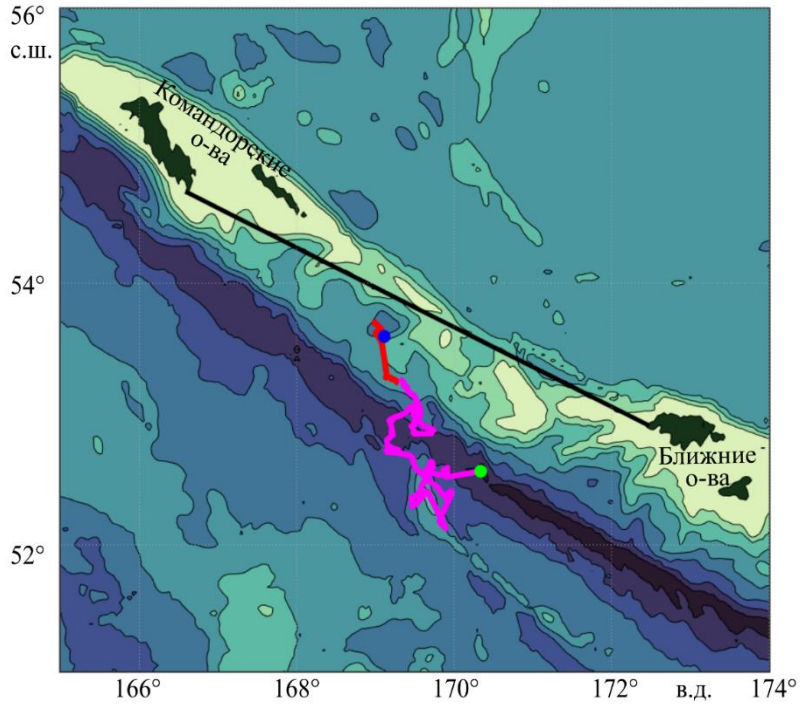
Анализ эпизода отрицательного расхода воды через пролив Ближний в 2021 г. Наименьший расход через пролив Ближний за 30-летний период наблюдений был зафиксирован в марте 2021 (–7,4 Св). Поток в южном направлении (вынос воды) составлял ~ 7 Св в начале и ~ 12 Св в конце указанного месяца. Отрицательный расход объясняется снижением затока (потока в северном направлении), который уменьшился с 15 Св в начале февраля до 5 Св в начале марта по данным *DT* и с 19 Св до 12 Св по данным *NRT* (рис. 2).

В поверхностном поле скорости этот эпизод проявляется в виде направленной на юго-восток струи в восточной части пролива Ближний, а также в виде крупного антициклонического вихря с центром к югу от оси пролива (рис. 4). Вертикальный разрез компоненты скорости *V*, нормальной к оси пролива, показывает преобладание отрицательных (южных) направлений. Максимальные значения отрицательной скорости наблюдаются в поверхностном слое и на глубинах до 1500 м.

Долгоживущий вихрь южнее оси пролива ограничивает проникновение вод в северном направлении, что также подчеркивается в работе [11]. На вертикальном разрезе компоненты скорости видны проявления восточной периферии вихря с динамическим сигналом, достигающим 20 см/с на глубине > 1 км в точке с координатами 53,7° с. ш., 169,7° в. д. Дополнительно следует подчеркнуть, что в батиметрии продуктов *CMEMS* наблюдаются не отраженные в реальной донной топографии подводные возвышения *GEBCO*_2021, которые могут вносить погрешности в расчеты скоростей на подповерхностных горизонтах.

Для дальнейшего анализа использованы траектории мезомасштабных вихрей в исследуемом районе по данным *META*3.2 *DT*. Был идентифицирован вихрь, наблюдавшийся южнее пролива Ближний в феврале – марте 2021 г. в период максимального выноса воды. На рис. 5 представлена траектория долгоживущего антициклонического вихря 750273, который возник 5 февраля 2020 г. на оси Алеутского желоба (52,6° с. ш., 170,3° в. д.) и диссипировал 14 марта 2021 г. в центральной части пролива Ближний (53,6° с. ш., 169,1° в. д.). В 2020 г. траектория вихря описывала сложную кривую вдоль желоба, в конце года вихрь достиг точки 53,2° с. ш., 169,3° в. д. В начале 2021 г. вихрь двигался на северо-запад, достиг точки 53,7° с. ш., 169,0° в. д., после чего сместился на юго-восток вдоль оси пролива. Несколько месяцев вихрь блокировал поступление вод из Тихого океана в Беринго́во море вблизи пролива. Таким образом, в феврале – марте 2021 г. стагнирующий у пролива крупный антициклонический вихрь в сочетании

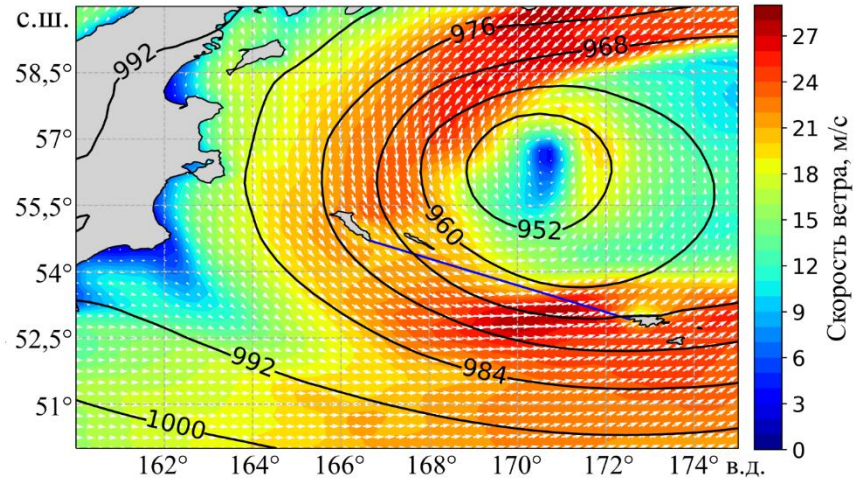
с усилением струи и сменой ее направления с восточного на юго-восточное способствовал формированию выноса воды из Берингова моря в Тихий океан.



Р и с. 5. Эволюция антициклонического вихря 750273 у пролива Ближний (черная линия) по данным *META*3.2 *DT*. Зеленая точка – место генерации вихря, синяя – место диссипации, сиреневая линия отображает траекторию за 2020 г., красная – за 2021 г.
F i g. 5. Evolution of anticyclonic eddy 750273 around the Near Strait (black line) based on the *META* 3.2 *DT* data. Green dot denotes the location of eddy generation, blue one – the location of its dissipation, lilac line shows the eddy trajectory for 2020, and red one – for 2021

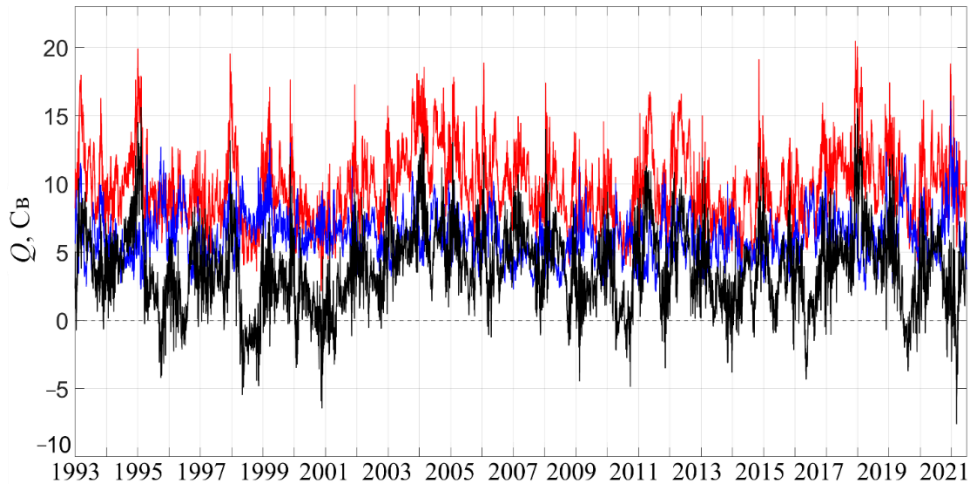
Согласно данным океанического реанализа, западная часть Северного Алеутского склонового течения проявляется в поле скорости на поверхности у Ближних о-вов (в восточной части пролива Ближний) со значениями > 40–50 см/с в феврале – марте. Вероятно, усиление течения связано с прохождением серии атмосферных циклонов над акваторией Берингова моря, один из которых показан на рис. 6.

В начале марта 2021 г. в северо-западной части Тихого океана наблюдались штормовые условия с усилением ветра до 30 м/с; 1 марта в 00:00 *UTC* центр циклона располагался к северу от пролива Ближний (56,5° с. ш., 170,5° в. д.) с атмосферным давлением на уровне моря ~ 950 гПа. Южная периферия циклона 1 марта находилась вдоль оси пролива Ближний и характеризовалась восточными направлениями ветра, максимальные скорости которого были зафиксированы у восточной части пролива, в той же области, где на рис. 4 отмечено усиление струи Северного Алеутского склонового течения.



Р и с. 6. Скорость (цвет) и направление (белые стрелки) ветра, атмосферное давление на уровне моря (черные изолинии) по данным *ERA*5 (00:00 *UTC*, 01.03.2021 г.)
F i g. 6. Wind speed (color shading) and direction (white arrows), atmospheric pressure at sea level (black lines) based on the *ERA*5 data (00:00 *UTC* on 01.03.2021)

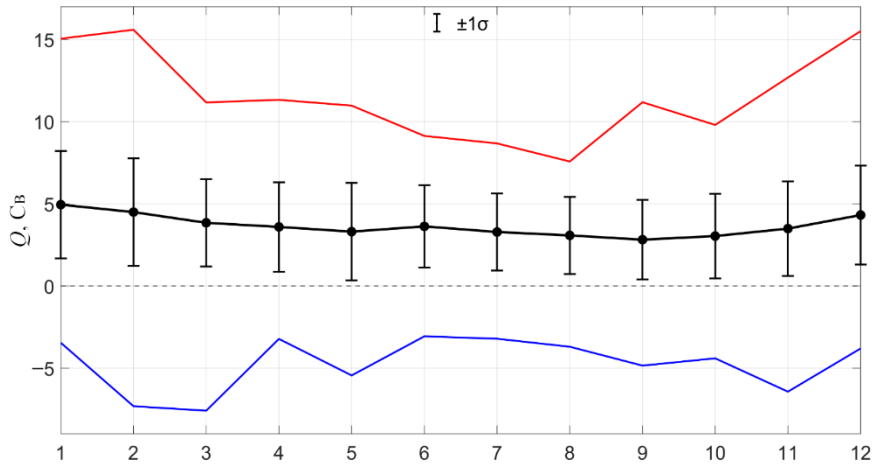
Анализ расхода воды за период 1993–2021 гг. Наши оценки показали, что в течение большей части временно́го интервала в указанный период заток из Тихого океана в Берингово море значительно превосходит вынос воды (рис. 7). Это свидетельствует о преобладании поступления океанских вод в Берингово море. Однако фиксируются отдельные эпизоды с отрицательным расходом, когда вынос воды из моря превышал заток вод. Наименьшие значения расхода (< –5 Св) были зафиксированы в 1998, 2000 и 2021 гг. Минимальный расход в 2021 г. составил –7,4 Св. В 1998 г. наблюдался длительный период выноса воды, продолжавшийся почти весь год.



Р и с. 7. Расход Q (черная линия), заток Q_+ (красная) и вынос Q_- (синяя) воды через пролив Ближний по среднесуточным данным *GLORYS*12*V*1 (*DT*) за период 1993–2021 гг.
F i g. 7. Volume transport Q (black line), inflow Q_+ (red line) and outflow Q_- (blue line) through the Near Strait based on the daily average *GLORYS*12*V*1 (*DT*) data for 1993–2021

Сезонность среднесуточного расхода через пролив Ближний четко выражена. Наибольшие значения расхода наблюдаются в зимний период, когда усиливается Алеутская депрессия, формирующаяся над островами архипелага, что приводит к сильным ветрам [10, 21]. В теплый период года акватория оказывается под влиянием летнего режима ветровой циркуляции, характеризующегося ослаблением ветра, что приводит к снижению транспортных потоков через пролив.

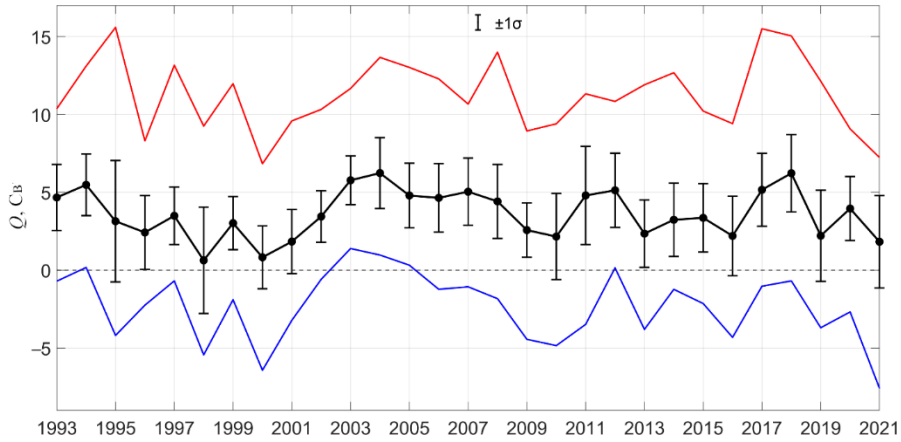
На рис. 8 и 9 представлена статистика расхода воды через пролив Ближний в 1993–2021 гг. Средние, максимальные и минимальные значения расхода показывают значительную изменчивость по месяцам и годам. Средний месячный расход составляет 2,8 Св (сентябрь) – 4,9 Св (январь) (рис. 8), что частично согласуется с работой [16], в которой среднегодовой минимум за период 1980–2004 гг. также приходится на сентябрь, а максимум – на ноябрь (в отличие от нашего исследования). Расход увеличивается в холодный период года (декабрь – март) (4–5 Св) и снижается в теплый (июль – октябрь) (~ 3 Св). Наименьший расход воды фиксируется в марте (–7,6 Св). Также наблюдается снижение расхода ниже –5 Св в феврале (–7,3 Св) и ноябре (–6,4 Св). Максимальный расход составляет 7,6 Св в августе и 15,6 Св в феврале. Как было показано выше, наибольшие значения расхода воды наблюдаются в зимний период, что подтверждается статистическими данными по месяцам.



Р и с. 8. Средний (черный цвет), минимальный (синий) и максимальный (красный) расход воды через пролив Ближний по месяцам за период 1993–2021 гг.
F i g. 8. Average (black), minimum (blue) and maximum (red) volume transport through the Near Strait by month for 1993–2021

Рассмотрим статистику расхода воды по годам через пролив Ближний в 1993–2021 гг. Среднегодовой расход составляет от 0,6 Св в 1998 г. до 6,2 Св в 2004 г. (рис. 9). Значения среднего годового расхода ниже единицы фиксируются в 1998 и 2000 гг., в то время как в отдельные годы расход превышал 5 Св (1994, 2003, 2004, 2012, 2017, 2018). Минимальный годовой расход колеблется от –7,6 Св в 2021 г. до 1,4 Св в 2003 г. Положительные минимальные значения наблюдаются в 1994, 2003, 2004 и 2005 гг., что

указывает на преобладание северного направления потока через пролив без выноса воды из Берингова моря. Максимальный расход воды в 1993–2021 гг. составляет от 7,2 Св в 2021 г. до 15,6 Св в 1995 г. В некоторые годы (1995, 2017, 2018) максимальный среднесуточный расход превышал 15 Св.



Р и с. 9. Средний (черный цвет), минимальный (синий) и максимальный (красный) расход воды через пролив Ближний по годам за период 1993–2021 гг.
F i g. 9. Average (black), minimum (blue) and maximum (red) volume transport through the Near Strait by year for 1993–2021

По нашим оценкам, среднемесячные значения расхода в проливе Ближний за период 1993–2021 гг. колеблются от 2,8 Св в сентябре до 4,9 Св в январе. Эти оценки отличаются от оценок, полученных в работе [16], в которой показано, что годовой ход расхода варьируется от 4,3 Св в сентябре до 6 Св в ноябре. Средний за весь период (1979–2004 гг.) расход воды по оценкам этих авторов составил 5,1 Св. Однако наша оценка среднего за период 1993–2021 гг. расхода составляет 3,7 Св. Это означает, что помимо смещения среднемесячного максимума с ноября на январь мы зафиксировали занижение среднего за весь период расхода воды. Мы также сделали предположение, что это связано с недооценкой скоростей течения в исследуемом районе по данным *DT*.

Отметим, что проблемы, приводящие к неточности оценки среднего расхода через пролив Ближний по данным численного моделирования, были также описаны в работе [4]. Авторы указывают, что в проливе Ближний (как и в Камчатском проливе) стандартное отклонение больше среднего значения расхода, что указывает на сложность оценки среднего расхода на основе краткосрочных наблюдений. Средний расход за один модельный год по оценкам [4] составил –0,96 Св, а стандартное отклонение было равным 3,2 Св. Авторы объясняют данные неточности сложной мезомасштабной динамикой в этих проливах. При этом более ранние оценки расхода через пролив Ближний в 6–12 Св, приведенные в работе [11], являются заниженными по отношению к нашим оценкам. Это еще раз говорит о необходимости оценки водообмена на более длительных промежутках времени с использованием современных реанализов, что и было сделано в настоящем исследовании.

Заключение

Для акватории пролива Ближний проведено сравнение четырех наборов данных: продуктов системы *CMEMS* (массивы *DT* и *NRT*) и реанализов *JCOPE2M* и *GOFS* 3.1 для первого полугодия 2021 г. (период перекрытия данных), на основании чего получены следующие выводы.

Суточные расходы по данным *NRT* превосходят соответствующие значения из массива *DT* на большем промежутке времени с 1 января по 30 июня 2021 г. (за исключением начала апреля и начала мая). Наибольшая разница расходов, полученных по данным двух массивов системы *CMEMS*, превышает 5 Св и наблюдается с конца января до начала февраля, в марте и в начале июня 2021 г.

Средний расход, вычисленный по данным *JCOPE2M*, оказался наибольшим из расходов, полученных по четырем массивам, и составил 6,2 Св, в то время как данные *GOFS* 3.1 (4,5 Св) показали результаты, сопоставимые с данными *NRT* (4,7 Св). Наименьший расход воды отмечается по данным *DT* (2,0 Св), что вдвое меньше, чем по данным *NRT* и *GOFS* 3.1, и втрое меньше, чем по данным *JCOPE2M*. Наименьший водообмен фиксируется по данным *GOFS* 3.1 (14,8 Св), за ним следует водообмен по данным *DT* (18,2 Св), *JCOPE2M* (21,6 Св) и *NRT* (22,8 Св).

Мезомасштабный антициклонический вихрь, расположенный к югу от оси пролива Ближний, обнаруживается на поверхности только по данным *DT*, в то время как по данным *JCOPE2M* и *GOFS* 3.1 вихрь не идентифицируется в поверхностном слое.

Получены оценки сезонной и долгопериодной изменчивости расхода за весь период проведения альтиметрических измерений по данным *DT*. Показано, что в 1993–2021 гг. на большей части временного отрезка заток превосходит вынос воды, то есть превалирует поступление вод из Тихого океана в Берингово море. Наибольшие значения суточного расхода (> 15 Св) отмечались в 1995, 2017, 2018 гг., наименьшие (< –5 Св) – в 1998, 2000, 2021 гг. Отмечается сезонность суточного расхода через пролив Ближний с максимальными значениями в холодный сезон года (весенне-зимний) и минимальными в теплый (осенне-летний), что может быть объяснено усилением и ослаблением Алеутской депрессии, влияние которой было отмечено ранее.

Зафиксированы эпизоды отрицательного расхода через пролив, означающие превалирование южных направлений течений над северными. Эпизод выноса воды из Берингова моря в Тихий океан наблюдался в марте 2021 г. при минимальном расходе –7,6 Св. На примере отрицательного расхода в марте 2021 г. рассмотрены возможные механизмы, ответственные за вынос воды из Берингова моря через пролив Ближний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Stabeno P. J.*, *Ladd C.*, *Reed R. K.* Observations of the Aleutian North Slope Current, Bering Sea, 1996–2001 // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2009. Vol. 114, iss. C5. C05015. https://doi.org/10.1029/2007JC004705
2. Progress of Fisheries-Oceanography Coordinated Investigations in the Gulf of Alaska and Aleutian Passes / C. W. Mordy [et al.] // Oceanography. 2023. Vol. 36, iss. 2–3. P. 94–100. https://doi.org/10.5670/oceanog.2023.218
3. *Zimmermann M.*, *Prescott M. M.* Passes of the Aleutian Islands: First detailed description // Fisheries Oceanography. 2020. Vol. 30, iss. 3. P. 280–299. https://doi.org/10.1111/fog.12519

4. *Ezer T.*, *Oey L.-Y.* On the dynamics of strait flows: An ocean model study of the Aleutian passages and the Bering Strait // Ocean Dynamics. 2013. Vol. 63, iss. 2–3. P. 243–263. https://doi.org/10.1007/s10236-012-0589-6

5. *Hunt G. L.*, *Jr.*, *Stabeno P. J.* Oceanography and ecology of the Aleutian Archipelago: spatial and temporal variation // Fisheries Oceanography. 2005. Vol. 14, iss. s1. P. 292–306. https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2005.00378.x

6. Nutrients and primary production along the eastern Aleutian Island Archipelago / C. W. Mordy [et al.] // Fisheries Oceanography. 2005. Vol. 14, iss. s1. P. 55–76. https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2005.00364.x

7. Phytoplankton community structure in the Western Subarctic Gyre of the Pacific Ocean during summer determined by a combined approach of HPLC-pigment CHEMTAX and metabarcoding sequencing / Q. Xin [et al.] // Frontiers in Marine Science. 2023. Vol. 10. 1116050. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1116050

8. Long Distance Transport of Subsurface Sediment-Derived Iron from Asian to Alaskan Margins in the North Pacific Ocean / M. Sieber [et al.] // Geophysical Research Letters. 2024. Vol. 51, iss. 20. e2024GL110836. https://doi.org/10.1029/2024GL110836

9. *Кивва К. К.*, *Кубряков А. А.* Сезонная и межгодовая изменчивость поля концентрации хлорофилла-*a* в Беринговом море по спутниковым данным // Исследования Земли из космоса. 2021. № 4. С. 28–45. https://doi.org/10.31857/S0205961421040047

10. Lagrangian study of mesoscale circulation in the Alaskan Stream area and the eastern Bering Sea / S. V. Prants [et al.] // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2019. Vol. 169–170. 104560. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.03.005

11. *Stabeno P. J.*, *Schumacher J. D.*, *Ohtani K.* Physical oceanography of the Bering Sea // The Bering Sea: a Summary of Physical, Chemical, and Biological Characteristics, and a Synopsis of Research / Eds. T. R. Loughlin, K. Ohtani. North Pacific Marine Science Organization, PICES : Alaska Sea Grant Press, 1999. P. 1–28.

12. *Stabeno P. J.*, *Reed R. K.* Circulation in the Bering Sea basin observed by satellite-tracked drifters: 1986–1993 // Journal of Physical Oceanography. 1994. Vol. 24. P. 848–854. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<1914:CITBSB>2.0.CO;2

13. *Reed R. K.*, *Stabeno P. J.* The return of the Alaskan Stream to Near Strait // Journal of Marine Research. 1993. Vol. 51. P. 515–527.

14. Water properties and flow over the deep Bering Sea basin, summer 1991 / R. K. Reed [et al.] // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1993. Vol. 40, iss. 11–12. P. 2325–2334. https://doi.org/10.1016/0967-0637(93)90107-E

15. Recent U.S.-U.S.S.R. cruise in Bering Sea / R. K. Reed [et al.] // Eos, Transactions American Geophysical Union. 1992. Vol. 73, iss. 16. P. 177–185. https://doi.org/10.1029/91EO00155

16. *Kinney J. C.*, *Maslowski W.* On the oceanic communication between the Western Subarctic Gyre and the deep Bering Sea // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2012. Vol. 66. P. 11–25. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2012.04.001

17. *Худякова С. П.*, *Травкин В. С.*, *Белоненко Т. В.* Мезомасштабные вихри Алеутского жёлоба // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 6. С. 211–221. EDN OBTVXU. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-6-211-221

18. *Budyansky M. V.*, *Prants S. V.*, *Uleysky M. Yu.* Odyssey of Aleutian eddies // Ocean Dynamics. 2022. Vol. 72. P. 455–476. https://doi.org/10.1007/s10236-022-01508-w

19. High Resolution Kuroshio Forecast System: Description and its Applications / T. Kagimoto [et al.] // High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean / Eds. K. Hamilton, W. Ohfuchi. New York, NY : Springer, 2008. P. 209–239. https://doi.org/10.1007/978-0-387-49791-4_13

20. *Winkelbauer S.*, *Mayer M.*, *Haimberger L.* StraitFlux – Precise computations of Water Strait fluxes on various Modelling Grids. Preprint // EGUsphere. 2024. 26 p. https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2883

21. *Жабин И. А.*, *Дмитриева Е. В.*, *Таранова С. Н.* Мезомасштабные вихри в Беринговом море по данным спутниковой альтиметрии // Исследование Земли из космоса. 2021. № 5. С. 46–65. https://doi.org/10.31857/S0205961421050109

Об авторах:

Худякова Софья Павловна, старший инженер лаборатории нелинейных динамических систем, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), магистр по направлению «Гидрометеорология», **ORCID ID: 0000-0001-9618-5190**, **Scopus Author ID: 58712741500**, **ResearcherID: MDS-6367-2025**, **SPIN-код: 1579-9500**, khydyakova.s@gmail.com

Белоненко Татьяна Васильевна, профессор кафедры океанологии, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет (199178, Россия, Санкт-Петербург, 10 линия В. О., д. 33–35), доктор географических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0003-4608-7781**, **Scopus Author ID: 6507005889**, **ResearcherID: K-2162-2013**, **SPIN-код: 1978-1620**, btvlisab@yandex.ru

Будянский Максим Васильевич, ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейных динамических систем, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-2291-6792**, **Scopus Author ID: 6508245236**, **ResearcherID: AAL-3030-2020**, **SPIN-код: 4301-2220**, plaztic@poi.dvo.ru

Улейский Михаил Юрьевич, ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейных динамических систем, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-6499-1470**, **Scopus Author ID: 6602391272**, **ResearcherID: G-7178-2015**, **SPIN-код: 6373-0580**, uleysky@poi.dvo.ru