

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-3-101-120>

УДК 551.465.53

Изменчивость суммарных течений в Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях по результатам буйковых наблюдений

А.Ю. Ипатов, С.Б. Кузьмин

*Арктический и антарктический научно-исследовательский
институт, Санкт-Петербург, Россия
ipatov@aari.ru, kuzmin@aari.ru*

Представлены результаты статистического анализа данных измерений параметров приповерхностных течений, выполненных на 690 автономных и притопленных буйковых станциях в 1956–2015 гг. в экспедициях ААНИИ в арктических морях. Изменчивость течений анализировалась отдельно в открытых акваториях и в проливах. Для анализа данных применён статистический метод векторно-алгебраического анализа. Рассчитаны простые статистические характеристик изменчивости течений: среднее, медиана, в некоторых случаях выделены максимум, минимум и коэффициенты асимметрии и эксцесса. Получены количественные оценки дисперсии суммарных (измеренных) течений, их пространственной однородности и направленности изменчивости. Установлена неравномерность параметров течений в различных слоях от поверхности до 25 метров: повышение изменчивости скорости течений от поверхности к слою 10–20 м с последующим понижением с глубиной. Линейная связанность течений понижается, начиная с горизонтов 10(12) – 25 м. Уменьшение изменчивости скорости течений с глубиной сопровождается повышением их пространственной упорядоченности, выраженной в понижении анизотропности дисперсии (в сжатии эллипса дисперсии). Возрастание изменчивости течений с глубиной характерно для измерений, выполненных подо льдом. Показана связь с рельефом дна и с ареалами распространения речных вод в летний период. Полученные результаты сравниваются с результатами других авторов в южных морях (Чёрное, Средиземное, Каспийское).

Ключевые слова: векторно-алгебраический анализ, буйковые станции, изменчивость суммарных течений, статистические характеристики, тензор дисперсии

Variability of total currents in the Kara, Laptev, East-Siberian, and Chukchi seas as a result of mooring data analysis

A.Yu. Ipatov, S.B. Kuzmin

*Arctic and Antarctic Research Institute,
Saint Petersburg, Russia
ipatov@aari.ru, kuzmin@aari.ru*

The results of the statistical analysis of data on the parameters of near-surface currents performed at 690 autonomous and submerged buoy stations in 1956–2015 during the expeditions of the Arctic and Antarctic research Institute in the Arctic seas are presented. The variability of currents was analyzed separately in open water areas and straits. The statistical method of vector-algebraic analysis was applied for the data analysis. Simple statistical characteristics of the variability of currents were calculated: the mean, the median, and, in some cases, the maximum, the minimum, skewness, and kurtosis. Quantitative estimates of the variance of total (measured) currents, their spatial homogeneity, and the direction of variability were obtained. Unevenness of the parameters of currents in different layers from the surface to the depth of 25 m was established: an increase in the variability of the velocity of currents from the surface to the 10–20 m layer followed by a decrease with depth. The linear connectivity of currents decreases from the horizons of 10(12)–25 m. A decrease in the variability of the velocity of currents with depth is accompanied by an increase in their spatial orderliness expressed in a decrease in the anisotropy of variance (in the compression of the variance ellipse). An increase in the variability of currents with depth is characteristic of measurements performed under ice. The relationship with bottom terrain and the areas of distribution of river water in summer is shown. The results of the study are compared with the results for other seas (the Black, Mediterranean, and Caspian seas).

Keywords: vector-algebraic analysis, buoy stations, variability of total currents, static characteristics, variance tensor

Введение

В настоящей работе исследуется изменчивость суммарных (измеренных) течений на акватории большинства морей шельфа Российской Арктики на основе статистического анализа данных, полученных в ходе прямых измерений. Для описания изменчивости течений используются показатели, полученные методом векторно-алгебраического анализа, а также статистические оценки полученных величин.

Несмотря на значительный объем измерений в экспедициях ААНИИ, к настоящему времени отсутствуют публикации, в которых были бы приведены сравниваемые между собой оценки изменчивости течений в арктических морях от Карского до Чукотского. При этом понятно, что изменчивость течений существенно зависит от региональных особенностей, таких как морфометрия и географическое положение места измерения ([15], разделы 1.1–1.3) при сравнении неединичных измерений. Также немногочисленны работы, в которых для морей оценивалась бы изменчивость течений с глубиной, сравнивалась изменчивость течений в прибрежных, открытых частях акваторий, проливах и заливах.

Объем и состав данных наблюдений позволили исследовать в основном процессы синоптического масштаба и мезомасштаба. Другим ограничением является отсутствие данных о вертикальном распределении плотности морской воды, синхронных с измерениями течений. При обобщении результатов расчётов значительное количество использованных в работе наблюдений обеспечило возможность использовать статистически обеспеченные оценки изменчивости скорости и направления течений как в целом для конкретного моря, так и для его отдельных акваторий.

Состояние вопроса

Первые работы, выполненные по данным прямых измерений в открытом океане и посвящённые изменчивости течений, появились в 1970–1980-х гг. Они были нацелены на определение преобладающих временных масштабов изменчивости течений в океане [3, 6, 14]. Работы, описывающие изменчивость течений в отдельных частях акваторий морей, появились несколько позднее. Для этого выделялись преобладающие временные масштабы изменчивости течений (также и при наличии нескольких лет наблюдений) и сравнивались статистические оценки параметров течений. Одной из ранних работ, выполненных по данным измерений течений в восточной части Чёрного моря, Азовском и Каспийском морях, является [15]. Для Чёрного моря и восточного Средиземноморья это работы В.Б. Титова, в которых представлены обобщённые данные нескольких серий прямых наблюдений в восточной [20, 22] и западной [20, 21] частях Чёрного моря и в восточном Средиземноморье [13]. Заслуживают упоминания также работы авторов, выполненные по данным измерений 2009–2012 гг. в прибрежной акватории Чёрного моря около г. Сочи [12] и Геленджика [10]. Для Каспийского моря аналогичные результаты представлены в работах [1, 23].

Для отдельных морей Российской Арктики и частей их акваторий следует упомянуть следующие научные работы Е.А. Захарчука: [8] (Чукотское море, 10 серий измерений 1990–1991 гг.), [9] (шельф моря Лаптевых, 1 серия измерений 2007 г.) и монографию [9] (Баренцево море, 13 серий измерений 1987–1988, 1991–1992 гг.; шельф моря Лаптевых, 3 серии измерений 1995–1996 гг.; Чукотское море и Берингов пролив, 10 серий измерений 1990–1991 гг.), а также статьи В.А. Рожкова с соавторами [17, 18] (Печорское море, 2 серии измерений, 2001–2003 гг.). В указанных работах акцент делался на выявлении преобладающих временных масштабов изменчивости скорости и направления течений. В контексте нашей работы интерес представляют [4] (Карское море, 6 серий измерений 2012–2013 гг.) и [11] (море Лаптевых, 48 летних и осенних серий измерений 1959–1961, 1967–1970, 1973, 1980 гг.).

Методики анализа данных

Поскольку течения являются векторными процессами, для получения статистических оценок их изменчивости использован аппарат векторно-алгебраического анализа [2]. Данный аппарат позволяет полноценно количественно описать изменчивость вектора совместно по скорости и направлению. При анализе измерений на парах горизонтов при нулевом сдвиге ковариационных функций можно говорить о «взаимной дисперсии» [16], изменчивости коллинеарных компонентов пары векторов, а также, в отличие от измерений на одном горизонте, и об изменчивости ортогональных компонентов векторов.

Вектор течения на горизонте 1 – $\vec{V}_1(u_1, v_1)$, где u – проекция вектора на ось X и v – проекция вектора скорости на ось Y. Аналогично на горизонте 2 – $\vec{V}_2(u_2, v_2)$. Тогда ковариационный тензор K представлен как (1). При максимальном сдвиге ковариационной функции $\tau = 0$ и одном векторе (автоковариационная функция), это будет тензор дисперсии.

$$K_{uv}(\tau) = \begin{pmatrix} K_{u1u2}(\tau) & K_{u1v2}(\tau) \\ K_{v1u2}(\tau) & K_{v1v2}(\tau) \end{pmatrix} \text{Equation.2,} \quad (1)$$

где $K_{u1u2}(\tau) = \frac{1}{T} \times \sum_{t=1}^{T-\tau} (u_1(t) - \bar{u}_1) \times (u_2(t + \tau) - \bar{u}_2)$; $\bar{u}_1 = \frac{1}{T} \times \sum_{t=1}^T u_1(t)$;
 $\tau = 0, 1, \dots, T - 1$.

Оценка изменчивости, дисперсии значений скорости – скаляр $I_1(0)$, линейный инвариант тензора дисперсии при нулевом сдвиге (2). В работе используем квадратный корень линейного инварианта $I_1(0)^{0.5}$, аналог среднеквадратичного отклонения. Для пар горизонтов 1 и 2 аналогичная оценка при $\tau = 0$ описывает взаимную дисперсию, обусловленную взаимной коллинеарной изменчивостью. Для сравнимости оценок (2), их значения нормируем на (3), трактуя как показатель коллинеарной взаимной дисперсии.

$$I_1^{12}(0) = K_{u1u2}(0) + K_{v1v2}(0), \quad (2)$$

$$\sqrt{I_1^{11}(0) \times I_1^{22}(0)} = \sqrt{(K_{u1u1}(0) + K_{v1v1}(0)) \times \sqrt{(K_{u2u2}(0) + K_{v2v2}(0))}}, \quad (3)$$

Используя (4), получим длину малой (λ_2) и большой (λ_1) полуосей (5) тензора дисперсии и показатель анизотропности χ , (6) — безразмерную оценку в пределах от 0 до 1, эксцентриситет тензора дисперсии. При $\chi \approx 0$ максимальная изменчивость имеет место в направлении большой полуоси, при $\chi \approx 1$, течения изменяют свою скорость во всех направлениях примерно одинаково.

$$I_2^{12}(0) = K_{u1u2}(0) \times K_{v1v2}(0) - \frac{1}{4} \times (K_{u1v2}(0) + K_{v1u2}(0)), \quad (4)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} (I_1^{12}(0) \pm \sqrt{I_1^{12}(0) \times I_1^{12}(0) - 4 \times I_2^{12}(0)} \text{Equation.2,} \quad (5)$$

$$\chi = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}. \quad (6)$$

Линейный инвариант (I_1) описывает общую изменчивость значений скорости. Показатель анизотропности χ описывает насколько течения изменчивы в толще воды по направлению, то есть рассеянию направлений изменчивости течений от основного направления течения — ориентации большой полуоси (λ_1). Последняя, оценка, обозначенная как α° (ориентация большой полуоси тензора дисперсии по направлению) в (7) находится в пределах от -90° до $+90^\circ$ и указывает на преобладающее направление, в котором изменяется скорость течений.

$$\alpha = \frac{1}{2} \times \arctg \left(\frac{K_{u1v2}(0) + K_{v1u2}(0)}{K_{u1u2}(0) - K_{v1v2}(0)} \right) \quad (7)$$

При применении данного математического аппарата к одному вектору индексы 1,2 в приведенных формулах заменяются на 1,1. Также в анализе взаимной изменчивости течений на паре горизонтов используется индикатор вращения тензора дисперсии (8).

$$D^{12}(0) = K_{u1v2}(0) - K_{v1u2}(0) \text{ Equation.2} \quad (8)$$

При сдвиге автоковариационной функции (1) $\tau = 0$, $D^{11}(0) = 0$ для взаимноковариационной функции $D^{12}(0) \neq 0$. Индикатор вращения описывает взаимную ортогональную изменчивость вектора. Нормируем его на (3), трактуя как показатель ортогональной взаимной дисперсии.

В качестве эксперимента для измерений на парах горизонтов рассчитаны вертикальные градиенты общей изменчивости скорости течения – $I_1(0)^{0.5}$ и вертикальные градиенты изменчивости течения по направлению χ . Вертикальная ось направлена вниз.

В том же ключе для пар горизонтов на одной буйковой станции (синхронные ряды) рассчитывался взаимноковариационный тензор, линейный инвариант (2) и индикатор вращения (8) которого при $\tau = 0$ взаимноковариаций нормировались, как показано выше. Тогда показатели «взаимной дисперсии» – коллинеарной и ортогональной, находятся в пределах от -1 до +1. Положительные значения коллинеарной взаимной дисперсии указывают на однонаправленную синхронную взаимную связь векторов, отрицательные — на противоположно направленную. Положительные значения ортогональной взаимной дисперсии указывают на преобладающее синхронное правое положение вектора 2 по отношению к вектору 1, отрицательные – напротив.

При анализе массивов полученных показателей изменчивости течений, являющихся скалярами, использовались их средние, экстремальные значения, медианы, коэффициенты асимметрии и эксцесса.

Использованные данные

База данных ГНЦ РФ «ААНИИ» по наблюдениям за течениями содержит массив результатов измерений на буйковых станциях за период с 1956 по 2015 год в морях Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском (рис. 1). База сформирована на основе экспедиционных данных по течениям, отобранных в фондах ААНИИ.

Для производства наблюдений за течениями использовались автономные буйковые станции (АБС) и притопленные буйковые станции (ПБС). Преобладают измерения, выполненные с помощью контактных измерителей БПВ и ЭСТ, значительно реже (1.8 % измерений от общего количества) – морской гидрологической вертушки и измерителя течений RCM-4 (0.9 %). В Чукотском море (1990 и 1995–1996 гг.) наблюдения выполнялись

контактным измерителем АЦИТТ (2,2 %). В 2005, 2006 и 2015 гг. в Чукотском и Карском морях измерения скорости и направления течения по слоям выполнялись с помощью акустических доплеровских профилографов течений acoustic Doppler current profiler (ADCP) (17,3 % измерений от общего количества).

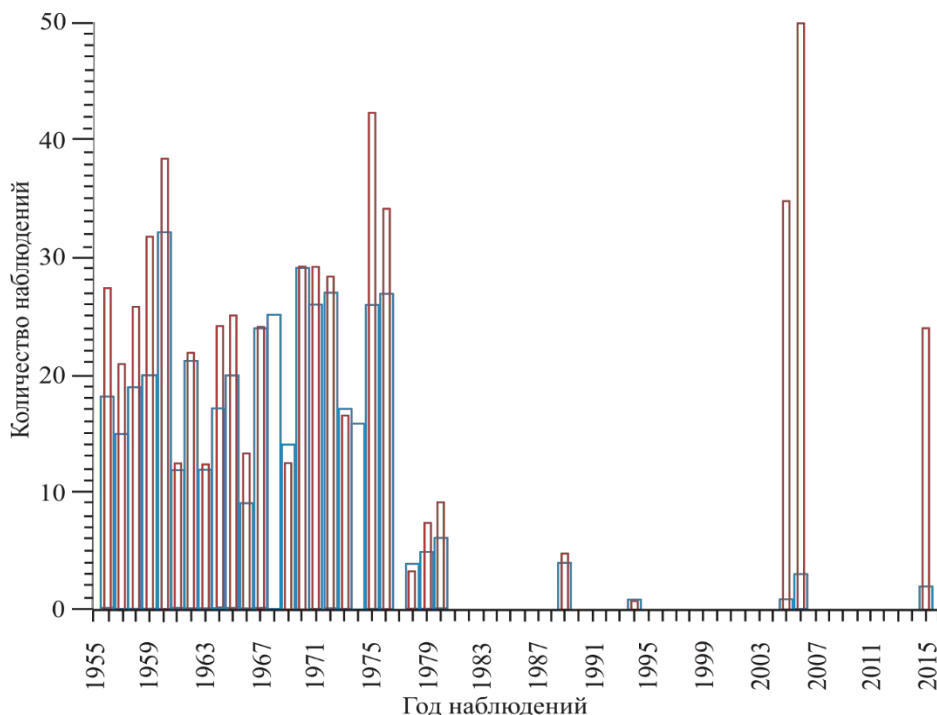


Рис. 1. Общее количество измерений – красные линии и точки наблюдения (буйковые станции) – синие линии, распределены по годам.

Fig. 1. The total number of recordings – red lines and observations points one (moorings) – blue lines by years.

Продолжительность анализируемых в данной работе реализаций – 127–9090 часов, данные приведены к дискретности 1 час. Средняя продолжительность рядов наблюдений в часах составила: Карское море – 998 часов, море Лаптевых – 529 часов, Восточно-Сибирское – 515 часов, Чукотское – 2508 часов. Без учёта данных измерений ADCP: Карское море – 513 часов, Чукотское море – 1116 часов. Наблюдения выполнялись преимущественно в теплое время года. В Карском море – 462 измерения (429 без измерений ADCP), в море Лаптевых – 85, в Восточно-Сибирском море – 56 (включая пр. Лонга) и в Чукотском море 156 (134 без измерений ADCP). При расчёте вертикальных градиентов изменчивости и взаимных корреляций использованы измерения, выполненные на 183 станциях.

Оценки изменчивости по морям и горизонтам измерений

Характеристика пространственной изменчивости течений в морях Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском представлена на рис. 2.

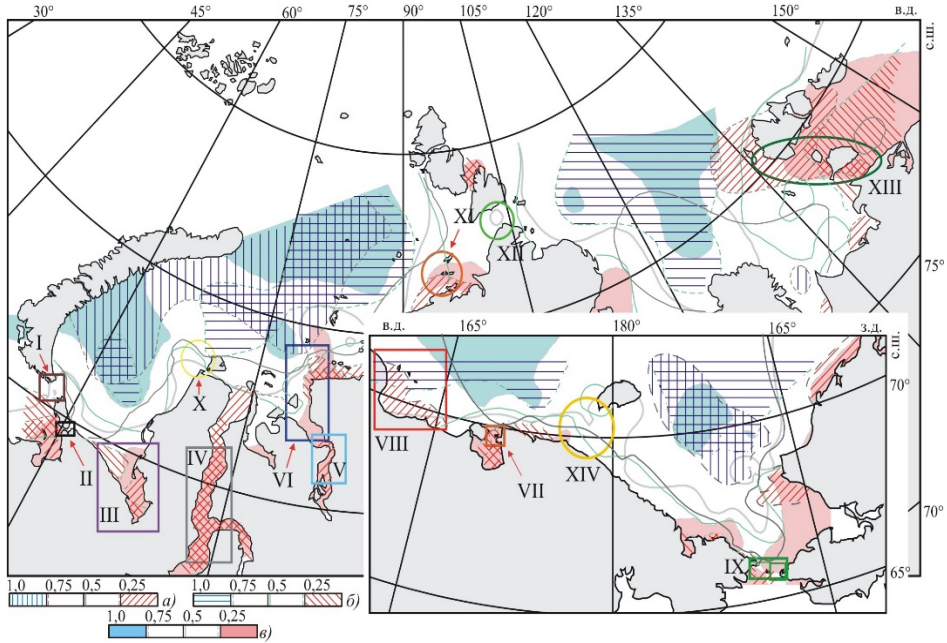


Рис. 2. Показатель анизотропности тензора дисперсии течений (χ) в морях Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском для горизонтов измерений 0–10 м (а), 10–20 м (б) и ниже 20 м (в). Римскими цифрами отмечено положение отдельных районов морей, название районов см. в табл. 1, 4.

Fig. 2. The anisotropy index of currents dispersions tensor (χ) distribution for Kara, Laptev, East-Siberian, Chukchi seas, related to recording levels 0–10 m (a), 10–20 m (b), deeper 20 m (v). Roman numerals indicate the location of individual sea areas, and the names of the areas are listed in Tables 1, 4.

Среднее, вычисленное по всем выборкам, значение общей изменчивости скорости характеристики ($I_1(0)^{0.5}$) составляет около 21,0 см/с, среднее значение изменчивости течений в толще воды по направлениям (χ) около 0,3 (безразмерная величина). Повышенные средние значения общей изменчивости скорости ($I_1(0)^{0.5}$) наблюдаются в Чукотском море. Наибольшие значения отмечаются в проливах: Беринговом, Югорский Шар, Дмитрия Лаптева, несколько ниже – в проливе Карские ворота (табл. 1). Максимальные абсолютные значения общей изменчивости скорости отмечены в поверхностном слое и в проливе Югорский Шар (78,56; 74,88 см/с). Наблюдения проводились в сентябре–октябре 1967, 1966 и 1965 годов.

Таблица 1. Средние (Me), медианы (Md), максимумы (Mx) и минимумы (Mn) для $I_1(0)^{0.5}$ и χ по горизонтам измерения (L) и районам морей.

Table 1. Mean (Me), median (Md), maxima (Mx) and minima (Mn) for $I_1(0)^{0.5}$ and χ estimations, related to recording levels (L) and seas regions.

Район	L	Средние (Me)		Медиана (Md)		Максимумы (Mx)		Минимумы (Mn)	
		$I_1(0)^{0.5}$	χ	$I_1(0)^{0.5}$	χ	$I_1(0)^{0.5}$	χ	$I_1(0)^{0.5}$	χ
	м	см/с	ед.	см/с	ед.	см/с	ед.	см/с	ед.
Карское море									
Все море	00->20 ¹	24,096	0,1730	20,996	0,3016	78,564	0,9297	2,596	0,0032
	00-10 ¹	22,234	0,2752	22,308	0,1944	78,564	0,9297	2,596	0,0032
	10-20 ¹	25,649	0,4508	22,660	0,4235	61,542	0,9607	5,869	0,0412
	>20 ¹	15,606	0,4142	13,603	0,3390	60,646	0,9796	4,399	0,0328
Карские ворота (I)	00->20	20,671	0,3877	19,890	0,3279	78,564	0,9297	2,596	0,0032
	00-10	21,844	0,3244	21,236	0,2870	78,564	0,9297	2,596	0,0032
	10-20	22,450	0,4451	21,127	0,3962	61,542	0,9607	5,869	0,0412
	>20	17,182	0,4426	15,983	0,4090	60,646	0,9796	4,399	0,0328
Югорский шар (II)	00-10	28,328	0,4262	28,972	0,4879	35,029	0,6130	20,054	0,2399
	10-20	30,450	0,3022	18,375	0,2912	38,937	0,3938	21,044	0,2525
	>20	18,194	0,3872	20,454	0,3240	28,730	0,8284	7,606	0,1264
Байдар. губа (III) ⁵	00-10	38,711	0,1722	32,804	0,0662	78,564	0,6238	19,126	0,0032
	10-20	29,684	0,2401	19,817	0,0773	61,542	0,6413	17,016	0,0412
	>20	35,104	0,1992	34,380	0,0860	60,646	0,5920	11,009	0,0328
Обская губа (IV)	00-10	20,210	0,2956	17,527	0,2560	30,299	0,7427	14,522	0,0664
	00-10 ¹	22,963	0,1488	23,046	0,1290	30,535	0,7427	14,522	0,0520
	10-20	19,848	0,3439	19,816	0,2540	36,464	0,6356	6,298	0,1218
Ен. залив (V) ⁶	00-10	12,836	0,2300	7,476	0,2060	41,165	0,6860	1,887	0,0140
	10-20	15,744	0,1012	9,974	0,0920	31,682	0,1780	7,451	0,0140
Западнее Диксона (VI)	00-10	22,562	0,2224	23,474	0,1616	33,222	0,7490	7,891	0,0320
	10-20	23,907	0,0775	25,368	0,0745	27,883	0,1540	15,113	0,0270
	>20	19,812	0,4019	18,503	0,3409	45,186	0,8303	3,682	0,0970
Открытая часть	00-10	22,483	0,3360	17,675	0,2117	55,796	0,8068	15,471	0,0520
	>20	15,641	0,4383	12,995	0,4720	28,880	0,8497	5,888	0,0430
	00-10	21,576	0,4273	22,548	0,3688	34,765	0,9297	2,596	0,0436
	10-20	22,134	0,6411	23,470	0,7244	37,197	0,9607	5,869	0,1499
	>20	20,812	0,6036	22,660	0,6880	37,197	0,9607	4,840	0,1230
Море Лаптевых	00->20	14,257	0,4316	12,624	0,3488	37,641	0,9796	4,399	0,0413
	00->20	22,229	0,4290	21,306	0,3916	100,0	0,9821	4,142	0,4340
	00-10	23,710	0,3296	21,614	0,2500	100,0	0,9644	5,531	0,0434
	10-20	20,528	0,5033	20,593	0,5055	38,981	0,9231	8,604	0,1012
	>20	21,634	0,5492	22,704	0,5640	36,954	0,9821	4,142	0,0466
Проливы ² (XIII)	00-10	27,450	0,2528	23,446	0,1434	100,0	0,9644	5,952	0,0434
	10-20	20,081	0,3489	17,771	0,3809	38,981	0,6311	8,604	0,1012
Открытая часть	00-10	19,067	0,4414	15,902	0,5212	46,042	0,9044	4,142	0,0483
	10-20	20,714	0,5676	20,884	0,5572	35,897	0,9231	9,521	0,1623
	>20	21,697	0,5853	22,704	0,6083	36,954	0,9821	4,142	0,0466

Восточно-Сибирское море

Восточно-Сибирское море									
Все море	00→>20	21,350	0,3945	22,455	0,3940	35,883	0,9403	3,037	0,0236
	00–10	19,437	0,2827	18,802	0,2434	34,706	0,7814	3,037	0,0236
	10–20	27,652	0,5632	26,734	0,5535	35,888	0,9203	19,229	0,2023
	>20	20,452	0,5100	20,028	0,5122	28,148	0,8010	5,649	0,0702
(VII) ³	00–10	27,032	0,1691	27,093	0,1406	34,361	0,2923	19,582	0,1030
(VIII) ⁴	00–10	17,986	0,2101	15,573	0,1529	27,098	0,7324	10,500	0,0236
Открытая часть	00–10	18,774	0,4015	19,742	0,3862	34,706	0,7814	3,037	0,0471
	10–20	27,652	0,5632	26,734	0,5535	35,888	0,9203	19,229	0,2023
	>20	20,525	0,5392	20,108	0,5320	28,148	0,8010	5,649	0,1839
Чукотское море									
Все море	00→>20	23,497	0,3480	21,930	0,2872	53,028	0,9117	1,030	0,0025
	00–10	24,195	0,3424	21,888	0,2784	53,028	0,9117	1,03	0,0025
	10–20	26,205	0,5042	25,493	0,5486	50,008	0,8713	15,335	0,0732
	>20	22,233	0,2959	18,757	0,2086	53,048	0,8333	6,034	0,0142
(IX) ⁷	00–10	29,316	0,2616	28,437	0,1421	53,028	0,9117	15,743	0,0471
	>20	23,814	0,1868	21,732	0,1367	53,048	0,7589	9,481	0,0142
(IX) ⁷ E	00–10	35,723	0,1775	34,759	0,1349	53,028	0,3477	21,288	0,0586
	>20	32,086	0,2499	32,332	0,1752	46,550	0,6959	18,303	0,0521
(IX) ⁷ W	00–10	27,086	0,2909	23,790	0,1421	45,652	0,9117	15,743	0,0471
	>20	22,310	0,1754	18,842	0,1342	53,048	0,7589	9,481	0,0142
Открытая часть	00–10	19,659	0,4139	19,224	0,3464	37,523	0,8713	1,030	0,0025
	10–20	25,212	0,5145	25,038	0,5556	41,142	0,8713	15,335	0,0732
	>20	20,514	0,3980	18,424	0,3411	41,140	0,8373	6,034	0,0241

Примечание. ¹ – включая данные измерений с помощью ADCP; ² – проливы Новосибирских островов; ³ – Чаунская губа; ⁴ – Колымский залив; ⁵ – Байдарцкая губа; ⁶ – Енисейский залив; ⁷ – Берингов пролив: E – восточная часть; W – западная часть пролива. Расположение районов приведено на рис. 2 и 3.

Для Восточно-Сибирского, Чукотского, Карского морей характерен рост средних значений и медиан показателей изменчивости от поверхностного слоя вниз к слою 10–20 м с последующим понижением на нижележащих горизонтах. В море Лаптевых имеет место обратная тенденция, при этом показатель изменчивости течений в толще воды по вертикали (χ) растёт с глубиной.

Для уточнения выявленной тенденции рассмотрим оценки изменчивости в более высоком разрешении по глубине без разделения по морям. В табл. 2 включены значения, вычисленные как по данным с использованием измерителей ADCP, так и при их исключении. По данным, представленным в табл. 2, общая изменчивость скорости течения имеет наибольшие значения в поверхностном слое 0–2 м и на горизонте 10–12 м (медианные значения $I_1(0)^{0.5}$ 26,6 и 24,6 см/с). Изменчивость течений в слоях 9–10 м по отношению к аналогичным величинам в слое 10–12 м примерно в 1,5 раза ниже при близких значениях $I_1(0)^{0.5}$. Считая возрастание изменчивости течений в слое 10–12 м вызванным размещением измерителей около пикноклина,

полагаем, что диссипация кинетической энергии на пикноклине происходит при потере упорядоченности линейного движения скорости. Это понижает интенсивность течений, то есть уменьшает их скорость в слое пикноклина и близко к нему.

Таблица 2. Средние, медианы, коэффициенты асимметрии (А) и эксцесса (Е) для $I_1(0)^{0.5}$ и χ , количество измерений (N, % к общему) по горизонтам измерения (L)

Table 2. Average, median, skewness (A) and excess (E) coefficients for $I_1(0)^{0.5}$ and χ , recordings number (N, % each number to total one) related to recording levels (L)

L	N	Средние (Me)		Медиана (Md)		Коэффициент				
						А		Е		
		$I_1(0)^{0.5}$	χ	$I_1(0)^{0.5}$	χ	$I_1(0)^{0.5}$	χ	$I_1(0)^{0.5}$	χ	
м	%	см/с	ед.	см/с	ед.	ед.	ед.	ед.	ед.	
С данными от ADCP										
00–02	1,495	24,096	0,1730	26,614	0,1205	-0,5256	2,6559	-0,8237	6,3906	
02–04	3,125	15,344	0,1965	15,306	0,1130	0,5522	2,2116	-0,4467	4,1299	
04–06	6,114	20,908	0,2854	20,584	0,1695	0,9522	1,0373	3,4496	-0,0766	
06–08	3,125	21,890	0,1857	20,915	0,1358	0,5272	2,1965	-0,8115	5,2482	
08–09	2,446	16,232	0,2423	17,489	0,2785	-0,2488	-0,1910	-0,9871	-0,7396	
09–10	24,728	24,216	0,3316	23,362	0,2877	1,4963	0,6483	5,6364	-0,4774	
10–12	14,402	25,059	0,5485	24,613	0,5708	0,8552	-0,2399	2,0672	-1,0120	
12–14	2,582	27,487	0,3979	21,216	0,3064	0,7402	0,3740	-0,8793	-1,3469	
14–16	3,940	23,052	0,3482	20,044	0,2882	1,1688	0,6126	0,6909	-0,7802	
16–20	3,804	20,499	0,3557	18,753	0,3170	0,5553	0,3967	-0,5264	-1,2205	
20–25	22,283	22,191	0,4087	20,028	0,3744	1,0038	0,2665	1,0882	-1,1528	
Без данных от ADCP										
00–02	0,951	24,681	0,2274	26,743	0,0983	-0,8439	1,2957	-0,4484	-0,0562	
02–04	2,694	11,207	0,2557	7,395	0,1910	1,7182	1,5147	2,0374	1,2228	
04–06	6,022	20,620	0,3403	19,690	0,2940	0,9810	0,6993	2,6796	-0,6509	
06–08	2,060	21,498	0,2146	17,865	0,1509	0,6320	1,5132	-1,1030	1,7397	
08–09	2,377	13,609	0,2648	16,765	0,2865	-0,3950	-0,6325	-1,0980	-0,1535	
09–10	28,526	24,288	0,3338	23,362	0,2926	1,5466	0,6311	5,7920	-0,4957	
10–12	16,165	24,972	0,5543	24,142	0,5758	1,0434	-0,2422	2,5068	-0,9876	
12–14	2,377	19,884	0,3163	17,399	0,1623	0,7560	1,0279	-0,4236	-0,2135	
14–16	3,803	19,582	0,3273	19,850	0,2472	0,3675	0,8483	1,1591	-0,5495	
16–20	3,645	17,830	0,3712	18,585	0,3279	0,3024	0,2232	-0,0291	-1,3556	
20–25	24,247	21,004	0,4347	19,405	0,4208	1,2566	0,2292	2,9847	-1,1510	

Известно, что интенсивность течений понижается с глубиной: в открытом океане [6] (понижение кинетической энергии с глубиной), на востоке Средиземного моря [13] и на северо-востоке [22] и западе [21] Черного моря. В Карском море [4] видим также устойчивое по значениям понижение изменчивости течений (линейный инвариант) с глубиной. К сожалению, приходится констатировать, что получение информации

о положении пикноклина при измерении течений является скорее исключением из общей практики. Сравним представленные величины изменчивости течений с аналогичными в работе [4] для северо-запада Карского моря. В этой работе авторы приводят значения величины общей изменчивости скорости $I_1(0)^{0.5}$, измеренные на буйковой станции ПАБС4, на горизонтах в слое 7,1–43,1 м равными 12,5–9,5 см/с, что значительно меньше показанных ниже в табл. 1 (20,92 см/с, 6–8 м и 20,03 см/с, 20–25 м) или ниже в табл. 5 (22,55 см/с) для открытой части Карского моря и слоя 0–10 м. Это объясняется годовым циклом измерений в [4], в то время как в нашей работе измерения выполнены преимущественно весной, летом и осенью. Значения $I_1(0)^{0.5}$ из [4] близки к нашим результатам, полученным в сентябре 1956 г. на горизонте 12 м (12,3 см/с) на ПБС, располагавшейся ближе всего к ПАБС4.

Более высокие значения коэффициента эксцесса общей изменчивости скорости в слое 9–12 м указывают на то, что более высокая изменчивость течений здесь преобладает по сравнению с прочими выделенными горизонтами. Некоторое возрастание изменчивости скорости течений в слоях 4–8 м, по-видимому, следует отнести к более высокой изменчивости на горизонтах, близких к пикноклину, по причине включения в анализ измерений, полученных в заливах и губах, где он расположен выше, чем в открытом море. Средняя глубина места для случаев постановки измерителей в слое 4–6 м составляет 16,9 м. Средние, медианы, экстремумы величины изменчивости $I_1(0)^{0.5}$ и χ , рассчитанные для акваторий исследуемых морей, см. в табл. 1. Наибольшая изменчивость течений отмечена в проливах: Югорский шар для всех горизонтов измерений, более низкие значения изменчивости течений имеют место в проливах Карские ворота (0–20 м), Беринговом (0–10 м), Дмитрия Лаптева, Санникова и Этерикан (0–10 м). Наиболее устойчивы по направлению течения в проливе Югорский шар – средние значения медиан величины изменчивости течений по направлению (χ) в толще пролива 0,076. Меньшая изменчивость течений по направлению характерна для мелководных заливов и проливов моря Лаптевых (средний горизонт постановки измерителя течений – 15,5 м), Обской губы (12,2 м) и Енисейского залива (18,3 м), Лонга (43,6 м) и не характерна для глубоководных проливов – Карские ворота (55,0 м) и Вилькицкого (143,3 м).

Течения в восточной части Берингова пролива по сравнению с его западной частью более изменчивы по скорости (в 1,3–1,4 раза). В среднем, по сравнению с открытыми частями морей, изменчивость скоростей течений в проливах выше в 1,36 раза, а устойчивость течений по направлению – выше в 1,7 раза. Среди рассматриваемых акваторий совокупно по скорости и направлению наименее изменчивы течения в Обской губе. Тенденция возрастания изменчивости скоростей течений в слое 10–20 м (9–14 м) характерна для открытых акваторий, а не для проливов, где в верхнем десятиметровом слое течения изменчивы по скорости и устойчивы по направлению. В открытых частях акватории на горизонтах измерения ниже 20 м

наблюдаются области более высокой изменчивости течений по скорости при относительно низкой изменчивости по направлению – севернее пос. Диксон; а области низкой изменчивости течений по направлению обнаружены в районе архипелага Норденшельда и на юго-западе моря Лаптевых (севернее о. Большой Бегичев), а также на востоке Чукотского моря. Последняя область ассоциируется с районом относительно стабильного переноса тихоокеанских вод в Чукотское море [7,24]. Области повышенной изменчивости течений по направлению (выделены голубым цветом на рис. 2) характерны для центральных частей акваторий. Аналогичная тенденция для Черного моря отмечена в [20], а для Ладожского озера приведена в [19].

Ориентация изменчивости течений

Направление изменчивости течений определяется ориентацией большой полуоси (БПО) тензора дисперсии течений (α°). На рис. 3 отрезками прямых приведены направления изменчивости течений для трех рассматриваемых диапазонов глубин.

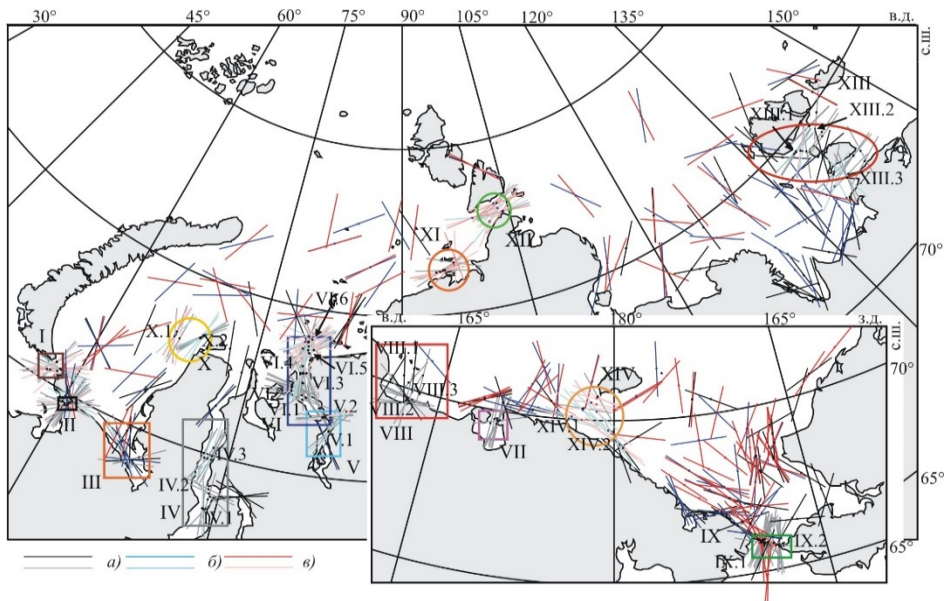


Рис. 3. Ориентация больших полуосей тензоров дисперсии течений (α°) в морях Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском для горизонтов измерений: 0–10 м (а); 10–20 м (б); свыше 20 м (в). Римскими цифрами отмечено положение отдельных районов морей, название районов в табл. 1, 4.

Fig. 3. Major semi-axis currents dispersion tensors directions (α°) for Kara, Laptev, East-Siberian, Chukchi seas, related to recording levels: 0–10 m (a); 10–20 m (б); deeper 20 m (в). Roman numerals indicate the location of individual sea areas, and the names of the areas are listed in Tables 1, 4.

Поскольку в выделяемых участках акваторий морей наблюдения проводились в соседних точках, отметим незначительные отличия между направлениями БПО тензора дисперсии для наблюдений, выполненных в различные годы. Наибольшие различия отмечены в западной части Берингова пролива (35°) на горизонтах в слое 0–10 м. В других акваториях значения меньше: 20–25° в проливах Карские ворота, Югорский Шар, Дмитрия Лаптева, западнее о. Белый, северо-западнее пос. Диксон; 10–20° в Обской и Чаунской губах, Енисейском заливе, проливе Санникова, около 10° в Колымском заливе и проливе Лонга, минимальные 6,2° в проливе Вилькицкого.

Ориентация изменчивости течений в заливах и проливах оказывается устойчивой от года к году: изменчивость течений ориентирована преимущественно параллельно естественным границам береговой линии в проливах и заливах. Некоторая согласованность между собой направлений изменчивости в открытых частях акваторий, выполненных в разные годы и в разные месяцы, может быть обусловлена преобладающим вкладом приливов в изменчивость наблюдаемых течений (рис. 3). Малые угловые разности между направлением результирующего вектора скорости течения и направлением преобладающей изменчивости при малых значениях показателя изменчивости по направлению (χ) могут указывать на квазистационарный характер движений и преобладающую изменчивость скорости течений в направлении преобладающей изменчивости.

Из всех наблюдений такие разности с углами менее 5° отмечены в 16,8 % случаев, а с углами менее 10° – в 32,4 % случаев. По выделенным горизонтам для отклонений менее 5° и 10° , соответственно: 0–10 м – 19,4 % и 36,2 %, 10–20 м – 12,2 % и 24,5 %, ниже 20 м – 16,5 % и 32,0 %. Таким образом, на горизонтах в слое 10–20 м разности с углами менее 5° и 10° встречаются наиболее редко. Такие случаи чаще всего имеют место в прибрежных областях, проливах и узкостях. Если рассматривать угловые разности ориентации между направлением результирующего вектора скорости течения и направлением преобладающей изменчивости между горизонтами наблюдений на буйковых станциях, то их повторяемость в пределах 5° составила 26,1 %, 5 – 10° – 20,35 %, 10 – 15° – 11,95 %, 15 – 20° – 23,45 %, 20 – 30° – 6,64 %, 30 – 50° – 6,19 %, 50 – 75° – 3,54%, свыше 75° – 1,77 %.

В процессе анализа дополнительно к описанным выше показателям изменчивости течений были рассчитаны также вертикальные градиенты изменчивости между слоями, средние и медианы вертикальных градиентов изменчивости течений между слоями и повторяемость абсолютных значений коллинеарной взаимной дисперсии и значений ортогональной взаимной дисперсии значения взаимных корреляций течений на соседних горизонтах (табл. 3–5).

Таблица 3. Средние (Me) и медианы (Md) для $I_1(0)^{0.5}$, χ ; и $I^{iv}(0)$, $D^{iv}(0)$, количество измерений (N% к общему) по горизонтам (L) измерений
Table 3. Average (Me) and median (Md) for $I_1(0)^{0.5}$, χ ; and $I^{iv}(0)$, $D^{iv}(0)$, recordings numbers (N% related to total one) by recordings levels (L)

L	N	Оценки взаимных корреляций				Вертикальные градиенты оценок				Примечания	
		$I^{iv}(0)$		$D^{iv}(0)$		$I_1(0)^{0.5}$		χ			
		Me	Md	Me	Md	Me	Md	Me	Md		
M	%	ед.	ед.	ед.	ед.	(см/с)/м	(см/с)/м	ед./м	ед./м	ед./м	ед./м
2-5	2,34	0,6479	0,8014	0,0696	0,0502	-1,0923	-0,6500	-0,0335	0,0020	0,0020	Все измерения в проливах и прибрежных районах
3-10	4,21	0,5410	0,4627	0,0838	0,0876	-0,0459	-0,0540	0,0019	0,0037	0,0019	Все измерения в проливах и прибрежных районах
2,8	0,5336	0,4080	0,0743	0,0691	0,0121	0,0232	0,0121	0,0088	0,0088	0,0121	Зимние измерения
5-8	2,34	0,8546	0,8543	0,1279	0,0456	-0,4621	-0,5500	0,0044	0,0060	0,0044	Все измерения в проливах и прибрежных районах
5-10	3,74	0,5437	0,4453	0,0929	0,0472	0,1266	0,2526	-0,0109	-0,0091	-0,0091	Летние измерения
2,34	0,6224	0,8602	0,0258	0,0258	0,2140	-0,1953	0,1544	-0,0078	-0,0091	-0,0091	Летние измерения
3,74	0,5697	0,4824	0,0823	0,0823	0,0746	-0,0248	-0,2226	0,0002	-0,0042	-0,0042	Все измерения в проливах и прибрежных районах
3,27	0,6044	0,5973	0,0826	0,0826	0,0690	-0,0833	-0,3248	-0,0003	-0,0074	-0,0074	Летние измерения
5-25	2,34	0,5048	0,5670	0,0696	0,0586	0,0110	-0,0803	-0,0054	-0,0089	-0,0089	Все измерения в проливах и прибрежных районах
10-15	8,41	0,5272	0,4974	0,0885	0,0878	-0,8718	-0,7620	0,0014	-0,0017	-0,0017	Летние измерения
2,80	0,6209	0,6167	0,0923	0,0923	0,1010	-0,5847	-0,6388	0,0009	-0,0075	-0,0075	Открытая часть морей летние измерения
4,21	0,6124	0,6346	0,0819	0,0819	0,0691	-0,2721	-0,1206	-0,0013	-0,0033	-0,0033	Все измерения
3,74	0,6437	0,7030	0,0732	0,0732	0,0643	-0,3168	-0,1273	-0,0054	-0,0063	-0,0063	Летние измерения
2,34	0,5110	0,4762	0,0894	0,0894	0,0820	-0,4920	-0,3624	-0,0072	-0,0081	-0,0081	Открытая часть морей летние измерения
29,91	0,3942	0,3977	0,1328	0,1328	0,1161	-0,2651	-0,3151	-0,0046	-0,0027	-0,0027	Все измерения
25,70	0,3647	0,3716	0,1249	0,1249	0,1056	-0,2541	-0,3151	-0,0048	-0,0023	-0,0023	Летние измерения
8,88	0,2007	0,1504	0,0883	0,0883	0,0998	-0,1728	-0,1885	-0,0052	-0,0020	-0,0020	Открытая часть морей летние измерения
3,74	0,3984	0,3538	0,0723	0,0723	0,0779	-0,8504	-0,6245	-0,0184	-0,0119	-0,0119	Все измерения открытая часть
2,80	0,4531	0,4276	0,0608	0,0608	0,0748	-0,7546	-0,4234	-0,0131	-0,0039	-0,0039	Летние измерения
23,83	0,3056	0,3232	0,0810	0,0810	0,0668	-0,3439	-0,2212	-0,0018	-0,0024	-0,0024	Летние измерения
12,67	0,2670	0,2461	0,0918	0,0918	0,0717	-0,2941	-0,2183	-0,0016	-0,0015	-0,0015	Открытая часть летние измерения
3,74	0,6246	0,7533	0,0905	0,0905	0,1021	-0,2558	-0,2708	0,0027	0,0011	0,0011	Все измерения в проливах и прибрежных районах
3,27	0,6697	0,7620	0,0942	0,0942	0,1027	-0,2824	-0,3577	0,0007	0,0010	0,0010	Летние измерения

Таблица 4 Средние значения вертикальных градиентов для $I_1(0)^{0.5}$ и χ между указанными горизонтами измерения L по районам морей.

Table 4 The average values of vertical gradients for $I_1(0)^{0.5}$ and χ between recording levels (L) by seas regions.

Море	Район	Горизонты измерений (L)	Кол-во измерений от всех	Средние значения оценок	
		м	%	$I_1(0)^{0.5}$	χ
				(см/с)/м	ед./м
Карское	пр. Карские ворота (I)	10–25	7,25	-0,7588	-0,0032
	пр. Югорский шар (II)	10–25	4,35	-0,7524	0,0027
	Байдарацкая губа (III)	10–15	4,35	-0,8078	0,0160
	Обская губа (IV)	3–10	8,70	0,0833	0,0020
	Обская губа (IV) ¹	3–10	7,25	0,1219	0,0037
	Енисейский залив (V)	5–10	4,35	-0,3166	-0,0041
	Западнее Диксона (VI) ²	10–15	4,35	-0,0627	-0,0122
	Западнее Диксона (VI) ³	10–14	4,35	-0,4440	-0,0158
			10–25	7,25	-0,3556
Восточно-Сибирское		12–20	5,80	-0,6422	-0,0045
	пр. Вилькицкого (XII)	12–25	5,80	-0,1739	0,0010
	пролив Лонга (XIV)	10–25	5,80	-0,0636	0,0013
Чукотское		12–25	8,70	-0,1660	-0,0087
	Берингов пролив (IX)	10–20	24,64	-0,1290	-0,0069
		>20	4,35	-0,3710	0,0018

Примечание. ¹ – только зимние измерения; ² – южная часть района: пролив Овчина между о. Сибирякова и материком (VI.4); ³ – мористая часть (северо-западнее пос. Диксон) (VI.5). Количество измерений (%) отнесено к общему количеству измерений градиентов оценок в данных районах.

Заключение

Для исследованных морей и отдельных частей их акваторий получены количественные оценки: дисперсии суммарных (измеренных) течений, их пространственной однородности (эксцентриситет тензора дисперсии) и направленности изменчивости.

Установлено усиление изменчивости скорости течений от поверхности к слою 10–20 м (9–14 м) с последующим понижением с глубиной. Линейная связанность течений (коллинеарная взаимная дисперсия) понижается начиная с горизонтов 10 (12) – 25 м. Уменьшение изменчивости скорости течений с глубиной сопровождается повышением пространственной упорядоченности, выраженной в понижении значений показателя анизотропности (то есть в сжатии эллипса дисперсии) в 59,4 % случаев. Обратная тенденция имеет место в 38,2 % случаев.

Таблица 5. Повторяемость (%) абсолютных значений коллинеарной взаимной дисперсии $I^{uv}_1(0)$ и значений ортогональной взаимной дисперсии $D^{uv}(0)$
Table 5. Probability (%) of collinear intercorrelation tensor estimations absolute values $I^{uv}_1(0)$ and orthogonal intercorrelation tensor ones $D^{uv}(0)$ for zero time shift

Море / часть акватории	Линейный инвариант взаимокорреляционного тензора $I^{uv}_1(0)$									
	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9
Карское ¹	12,06	16,31	9,22	11,35	15,60	9,22	4,96	7,80	7,80	5,67
Карское	13,08	17,69	10,0	11,54	14,89	10,0	4,62	6,92	5,38	4,62
Лаптевых	0,0	5,26	10,52	15,79	26,32	21,05	5,26	5,26	10,52	0,0
Восточно-Сибирское	12,5	6,25	12,5	12,5	25,0	6,25	6,25	12,5	6,25	0,0
Чукотское	17,31	9,62	5,76	9,62	19,23	11,54	7,69	13,46	3,85	1,92
Заливы и губы ¹	2,77	8,33	8,33	11,11	8,33	5,56	5,56	16,67	16,67	16,67
(только летние)	0,0	10,71	7,14	10,71	3,57	3,57	7,14	17,86	21,43	17,86
Заливы и губы	3,7	11,11	11,11	14,81	7,40	7,40	7,40	14,81	7,40	14,81
(только летние)	0,0	15,79	10,53	15,79	0,0	5,26	10,53	15,79	10,53	15,79
Проливы	10,42	12,5	6,25	12,5	18,75	14,58	8,33	12,5	4,17	0,0
(только летние)	10,87	13,04	4,35	13,04	17,39	15,22	8,70	13,04	4,35	0,0
Проливы и узости	9,09	12,12	6,06	13,64	16,67	12,12	7,58	12,12	4,54	6,06
(только летние)	8,93	14,28	3,57	14,28	14,28	12,5	8,93	12,5	5,36	5,36
Около островов и прибрежные	11,29	8,06	6,45	4,83	27,42	9,68	9,68	8,06	11,29	3,22
Открытая часть	22,0	14,0	12,0	22,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Море / часть акватории	Индикатор вращения взаимокорреляционного тензора ($D^{uv}(0)$)									
	Отрицательные значения					Положительные значения				
	<0,4	0,4-0,3	0,3-0,2	0,2-0,1	0,1-0,0	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	>0,4
Карское ¹	0,7	1,42	2,13	17,02	21,28	36,9	14,18	5,67	0,0	0,7
Карское	0,74	1,48	2,22	17,78	22,22	34,09	14,81	5,92	0,0	0,74
Лаптевых	0,0	0,0	0,0	21,05	26,32	36,84	10,53	5,26	0,0	0,0
Восточно-Сибирское	0,0	0,0	0,0	0,0	6,25	43,75	37,5	6,25	6,25	0,0
Чукотское	0,0	1,85	0,0	3,7	20,37	36,56	18,26	6,52	1,3	0,86
Заливы и губы ¹	0,0	0,0	3,03	9,09	21,21	45,46	15,15	3,03	3,03	0,0
(только летние)	0,0	0,0	4,0	8,0	16,0	48,0	16,0	4,0	4,0	0,0
Заливы и губы	0,0	0,0	3,7	11,11	25,92	33,33	18,52	3,7	3,7	0,0
(только летние)	0,0	0,0	5,26	10,52	21,05	31,6	21,05	5,26	5,26	0,0
Проливы	1,96	1,96	0,0	5,88	17,65	37,26	13,72	15,69	3,92	1,96
(только летние)	0,0	2,04	0,0	6,12	16,33	38,78	14,28	16,33	4,08	2,04
Проливы и узости	1,41	1,41	0,0	7,04	19,72	38,03	14,08	12,68	4,22	1,41
(только летние)	0,0	1,69	0,0	6,78	16,95	40,67	15,25	13,59	3,38	1,69
Около островов и прибрежные	0,0	2,94	2,94	20,59	25,0	25,0	22,06	1,47	0,0	0,0
Открытая часть	0,0	0,0	0,0	11,32	24,53	45,28	16,98	1,89	0,0	0,0

Примечание. ¹ Включая измерения, выполненные с применением измерителей ADCP.

Возрастание изменчивости течений с глубиной характерно для измерений, выполненных подо льдом. Отмечено значительное (в 1,5 раза) превышение значений показателя анизотропности в слое 10–12 м по отношению к слою 9–10 м при близких значениях линейного инварианта.

Наибольшая изменчивость течений наблюдается в мелких проливах, максимальная – в проливе Югорский Шар. В среднем, изменчивость скоростей течений в проливах в 1,36 раза, а устойчивость течений по направлению в 1,7 выше, чем в открытых частях морей. Направления изменчивости течений преимущественно ориентированы вдоль естественных границ проливов относительно побережий. В открытых частях акваторий направления течений в разных слоях более согласованы между собой, несмотря на различия в годах наблюдений, возможно указанная тенденция определяется преобладающей приливной компонентой в структуре суммарного течения.

Отмечено повышение дисперсии скорости течений с глубиной в Чукотском море – над полузамкнутым понижением рельефа дна южнее острова Геральд и в акватории от Колючинской губы до мыса Дежнева, соответствует минимуму и максимуму значений среднего многолетнего содержания кремния в донных водах. Возможно, повышение дисперсии скорости течений с глубиной здесь совпадает с вертикальными движениями, вызывающими изменение содержания кремния в морской воде по сравнению с соседними участками акватории моря. В заключение подчеркнём, что полученные в работе оценки изменчивости параметров течений сравнимы с результатами, полученными по другим морям представленных в работах [3, 10, 12, 13, 19, 22].

Исследование проведено в рамках темы 1.5.3.3 ЦНТП Росгидромета и проекта 5.1.4, темы 053024 Росгидромета.

The research was funded within foundation 1.5.3.3 CSTP Roshydromet and project 5.1.4 foundation 053024 Roshydromet.

Список литературы

1. Амбросимов А.К. Пространственно-временная изменчивость характеристик течения в глубоководной части Среднего Каспия // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 60-77.
2. Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометиздат, 1983. 264 с.
3. Бышев В.И., Чекотилло К.А. Статистический анализ некоторых измерений скорости течений в Северной Атлантике // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1974. Том 10, № 3. С. 266-275.
4. Гудишников Ю.П., Нестеров А.В., Рожков В.А., Скутина Е.А. Изменчивость течений Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Том 64, № 3. С. 241-248.
5. Доронин Ю.П. Региональная океанология. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 302 с.
6. Дроздов В.Н., Монин А.С., Ющина И.Г. Спектры течений ПОЛИМОДЕ // Доклады АН СССР. 1981. Том 258, № 2. С. 331-334.
7. Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. Об интенсивности течений разных временных масштабов в Чукотском море и Беринговом проливе // Метеорология и гидрология. 2006. № 1. С. 76-85.

8. Захарчук Е.А., Сухачев В.Н., Тихонова Н.А. Статистическая структура течений синоптического масштаба в районе материкового склона моря Лаптевых и особенности их генерации под действием аномобарических сил // *Океанология*. 2016. Том 56, № 5. С. 683-700.
9. Захарчук Е.А. Синоптическая изменчивость уровня и течений в морях, омывающих северо-западное и арктическое побережье России. СПб.: Гидрометеоздат; 2008. 360 с.
10. Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О., Куклева О.Н., Соловьев Д.М. Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // *Океанология*. 2012. Том 52, № 5. С. 629-642.
11. Ипатов А.Ю. Особенности пространственного распределения изменчивости течений синоптического масштаба в море Лаптевых // *Труды ААНИИ*. 2003. Том 446. С. 185-192.
12. Короткина О.А., Завьялов П.О., Осадчиев А.А. Синоптическая изменчивость течений в прибрежной акватории г. Сочи // *Океанология*. 2014. Том 54, № 5. С. 581-593.
13. Кривошея В.Г., Титов В.Б., Москаленко Л.В., Удодов А.И., Якубенко В.Г., Абокора И., Борас К., Абосамра Ф. Циркуляция вод и изменчивость течений в восточном Средиземноморье между побережьем Сирии и о. Кипр в летний сезон // *Океанология*. 1997. Том 37, № 1. С. 27-34.
14. Монин А.С., Каменкович В.М., Корт В.Г. Изменчивость мирового океана. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 261 с.
15. Овсянникова О.А. Некоторые закономерности изменчивости течений в морях без приливов // *Труды ГОИН*. 1974. Вып. 121. С. 78-84.
16. Рожков В.А. Теория вероятностей случайных событий, величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Книга II. СПб.: Прогресс-Погода, 1996. 558 с.
17. Рожков В.А., Сухих Н.А. Изменчивость течений в Печорском море // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016. Том 1, № 107. С. 84-95.
18. Рожков В.А., Сухих Н.А. Векторный дисперсионный анализ изменчивости течений в Печорском море // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017. Том 1, № 111. С. 30-38.
19. Рожков В.А., Филатов Н.Н. О некоторых особенностях мезомасштабной и синоптической изменчивости морских течений // *Труды ГГО*. 1975. Вып. 364. С. 178-191.
20. Титов В.Б. Влияние конфигурации береговой линии на характеристики прибрежных течений // *Метеорология и гидрология*. 2007. № 8. С. 64-68.
21. Титов В.Б. Статистические характеристики и изменчивость течений на западном шельфе Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 1991. № 2. С. 41-47.
22. Титов В.Б., Савин М.Т. Изменчивость придонных течений на северо-восточном шельфе Черного моря // *Океанология*. 1997. Том 37, № 1. С. 50-55.
23. Ghaffari P., Chegini V. Acoustic Doppler current profiler observations in the southern Caspian Sea: shelf currents and flow field off Ferodoonkenar Bay, Iran // *Ocean Science*. 2010. Vol. 6, no. 3. P. 737-748.
24. Woodgate R.A., Stafford K.M., Prahл F.G. A synthesis of year-round interdisciplinary mooring measurements in the Bering strait (1990-2014) and the RUSALCA years (2004-2011). // *Oceanography*. 2010. Vol. 28, no. 3. P. 46-67.

References

1. Ambrosimov A.K. Spatiotemporal variability of the flow in the deep part of the Central Caspian Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, pp. 43-56. DOI: 10.3103/S1068373916010064.
2. Belyshev A.P., Klevantsov Yu.P., Rozhkov V.A. Veroyatnostnyy analiz morskikh techeniy [Probabilistic Analysis of Marine Currents]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1983, 264 p. [in Russ.].
3. Byshev V.I., Chekotillo K.A. Statistical analysis of some speed data received in northern Atlantic. *Izvestiya AN SSSR. FAO [Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Atmospheric and Oceanic Physics]*, 1974, vol. 10, no. 3, pp. 266-275 [In Russ.].

4. Gudoshnikov Iu.P., Nesterov A.V., Rozhkov V.A., Skutina E.A. Currents variability of the Kara Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2018, vol. 64, no. 3, pp. 241-248 [In Russ.].

5. Doronin Yu.P. Regional'naya okeanologiya [Regional Oceanology]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 302 p. [in Russ.].

6. Drozdov V.N., Monin A.S., Iushchina I.G. Spektry techeniy POLIMODE [POLYMODE current spectra]. *Doklady AN SSSR [Proc. of the Academy of Sciences of the USSR]*, 1981, vol. 258, no. 2, pp. 331-334 [in Russ.].

7. Zakharchuk E.A., Tikhonova N.A. On the intensity of currents of different time scales in the Chukchi sea and Bering strait. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2006, no. 1, pp. 76-85 p. [in Russ.].

8. Zakharchuk E.A., Sukhachev V.N., Tikhonova N.A. The statistical structure of synoptic variability ocean currents at the continental slope of the Laptev Sea and features of their generation by anemobaric forces. *Oceanology*, 2016, vol. 56, no. 5, pp. 621-636. DOI: 10.1134/S0001437016050155.

9. Zakharchuki, E.A. Sinopticheskaya izmenchivost' urovnya i techeniy v moryah, omyvayushchih severo-zapadnoe i arkticheskogo poberezh'e Rossii [Synoptic Variability of Levels and Currents in the Seas Surrounding the North-Western and Arctic Coasts of Russia]. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 200, 360 p. [in Russ.].

10. Zatselin A.G., Piotukh V.B., Korzh A.O., Kukleva O.N., Solov'ev D.M. Variability of currents in the coastal zone of the Black Sea from long-term measurements with a bottom mounted ADCP. *Oceanology*, 2012, vol. 52, no. 5, pp. 579-592. DOI: 10.1134/S0001437012050177.

11. Ipatov A.Yu. Osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya izmenchivosti techeniy sinopticheskogo masshtaba v more Laptevyy [Features of the space distribution of variability synoptic scales currents in the Laptev Sea]. *Trudy AANII [Proc. of AARI]*, 2003, vol. 446, pp. 185-192 [in Russ.].

12. Korotkina O.A., Zav'ialov P.O., Osadchiv A.A. Synoptic variability of currents in the coastal waters of Sochi. *Oceanology*, 2014, vol. 54, no. 5, pp. 545-556. DOI: 10.1134/S0001437014040079.

13. Krivosheia V.G., Titov V.B., Moskalenko L.V., Udodov A.I., Iakubenko V.G., Abokora I., Boras K., Abosamra F. Cirkulyaciya vod i izmenchivost' techeniy v vostochnom Sredizemnomor'e mezhdru poberezh'em Sirii i o. Kipr v letniy sezon [Water circulation and currents variability in the eastern Mediterranean between coasts of Syria and Cyprus in summer. *Okeanologiya [Oceanology]*, 1997, vol. 37, no. 1, pp. 27-34 [in Russ.].

14. Monin A.S., Kamenkovich V.M., Kort V.G. Izmenchivost' mirovogo okeana [Variability of the World Ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1974, 261 p. [in Russ.].

15. Ovsianikova O.A. Nekotorye zakonomernosti izmenchivosti techeniy v moryah bez prilivov [Some regularities of the currents variability in non-tidal seas]. *Trudy GOIN*, 1974, vol. 121, pp. 78-84 [in Russ.].

16. Rozhkov V.A. Teoriya veroyatnostey sluchaynykh sobytii, velichin i funkciy s gidrometeorologicheskimi primerami. Kniga II. [Theory of Probabilities of Random Events, Quantities, and Functions with Hydrometeorological Examples. Book II]. Saint Petersburg, Progress-Pogoda, 1996, 558 p. [in Russ.].

17. Rozhkov V.A., Sukhikh N.A. Variability of currents in the Pechora Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2016, vol. 107, no. 1, pp. 84-95 [in Russ.].

18. Rozhkov V.A., Sukhikh N.A. Analysis of variance of sea currents variability in the Pechora Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2017, vol. 111, no. 1, pp. 30-38 [in Russ.].

19. Rozhkov V.A., Filatov N.N. O nekotorykh osobennostyakh mezomasshtabnoy i sinopticheskoy izmenchivosti morskikh techeniy [On some peculiarities of mesoscale and synoptical variability of sea currents]. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 1975, vol 364, pp. 178-191 [in Russ.].

20. Titov V.B. Influence of shoreline configuration on characteristics of coastal currents. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2007, vol. 32, no. 8, pp. 520-523. DOI: 10.3103/S1068373907080079.

21. Titov V.B. Statisticheskie karakteristiki i izmenchivost' techeniy na zapadnom shel'fe Chernogo morya [Statistical characteristics and variability of currents over the western Black Sea]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal [Sea hydrophysical journal]*, 1991, no. 2, pp. 41-47 [in Russ.].
22. Titov V.B., Savin M.T. Variability of near-bottom currents on the northeastern Black Sea shelf. *Okeanologiya [Oceanology]*, 1997, vol. 37, no. 1, pp. 50-55 [in Russ.].
23. Ghaffari P., Chegini V. Acoustic Doppler current profiler observations in the southern Caspian Sea: shelf currents and flow field off Ferodoonkenar Bay, Iran. *Ocean Science*, 2010, vol. 6, no. 3, pp. 737-748.
24. Woodgate R.A., Stafford K.M., Prahel F.G. A synthesis of year-round interdisciplinary mooring measurements in the Bering strait (1990-2014) and the RUSALCA years (2004-2011). *Oceanography*, 2010, vol. 28, no. 3(4), pp. 46-67.

*Поступила 01.09.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025;
принята в печать 15.10.2025.*

*Submitted 01.09.2025; approved after reviewing 01.10.2025;
accepted for publication 15.10.2025.*