

УДК 551.465.53

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-241-249

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ КАРСКОГО МОРЯ

Ю.П. ГУДОШНИКОВ¹, А.В. НЕСТЕРОВ¹, В.А. РОЖКОВ^{1,2}, Е.А. СКУТИНА^{1*}

¹ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*elskut@aari.ru

CURRENTS VARIABILITY OF THE KARA SEA

Yu.P. GUDOSHNIKOV¹, A.V. NESTEROV¹, V.A. ROZHKOVA^{1,2}, E.A. SKUTINA^{1*}

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² — Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*elskut@aari.ru

Received July, 12, 2018

Accepted September, 7, 2018

Keywords: Kara Sea currents, spectral analysis of vector stochastic processes and fields, vector variance analysis.

Summary

To study the water dynamics of the Kara Sea in the prospective areas of shelf development, the instrumental measurements of currents speeds were made at 6 submerged autonomous buoy stations with about a year duration for 5 of them and about half a year duration for 1.

A spectral analysis of implementations of these measurements allowed to determine, that characteristic currents feature is a presence of annual, tidal and synoptical components of currents speeds variability. The contribution estimate of each of these components into the total process variance using the method of vector variance analysis was performed in the work.

Estimates of currents speeds show almost the same character of variability at all submerged autonomous buoy stations by all parameters. It is appearing in the numerical values of main parameters of variability, profiles shape of their vertical distribution, evolution of these profiles in the annual course and in the correlations of summary current characteristic and its nonperiodical component. At all 6 submerged autonomous buoy stations along all depths, mean currents are directed to N-NNE-NE and

Citation: Gudoshnikov Yu.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, 64, 3: 241–249. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-241-249

values of mean scalar speed of summary current and maximum at upper horizons are changing within relatively small limits of 10,5–1,5 cm/s and 65–80 cm/s correspondingly. For vertical distribution, it is typical a decrease with a depth the values of speeds and their variability when the direction of mean transfer and relative proximity to it of maximum variability direction is preserved. The annual course is well-defined and becomes apparent in increase of current speeds and their variability in case of simultaneous strengthening of vertical contrast in spring and summer. The variability of nonperiodical current at all depths and corresponding vertical contrasts are weakened in comparison with summary current and ellipses shape of standard deviation is more elongate.

Поступила 7 июля 2018 г.

Принята к печати 7 сентября 2018 г.

Ключевые слова: векторный дисперсионный анализ, спектральный анализ векторных случайных процессов и полей, течения Карского моря.

Для изучения динамики вод Карского моря в перспективных районах хозяйственного освоения шельфа были сделаны инструментальные измерения скорости течений на 6 плавучих автономных буйковых станциях, продолжительностью около года на 5 из них и около полугода на Викуловской.

Спектральный анализ реализаций этих измерений позволил установить, что характерной особенностью течений является наличие годовой, приливной и синоптической составляющих изменчивости скорости течения. В работе выполнена оценка вклада каждой из этих составляющих в общую дисперсию процесса методом векторного дисперсионного анализа.

Оценки скоростей течений демонстрируют практически одинаковый характер изменчивости на всех плавучих автономных буйковых станциях по всем параметрам. Это проявляется в числовых значениях основных параметров изменчивости, форме профилей их вертикального распределения, эволюции этих профилей в годовом ходе и в соотношениях характеристик суммарного течения и его непериодической составляющей. На всех шести плавучих автономных буйковых станциях на всех глубинах средние течения направлены на С-ССВ-СВ, а значения средней скалярной скорости суммарного течения и максимума на верхних горизонтах изменяются в относительно узких пределах 10,5–1,5 см/с и 65–80 см/с соответственно. Для вертикального распределения характерно уменьшение с глубиной величин самих скоростей и их изменчивости при сохранении направления среднего переноса и относительной близости к нему направления максимальной изменчивости. Годовой ход хорошо выражен и проявляется в увеличении весной и летом скоростей течения и их изменчивости при одновременном усилении вертикальных контрастов. Изменчивость непериодического течения на всех глубинах и соответствующие вертикальные контрасты ослаблены сравнительно с суммарным течением, а форма эллипсов СКО более вытянутая.

ВВЕДЕНИЕ

В Карском море в 2012–2013 гг. были поставлены шесть плавучих автономных буйковых станций (ПАБС) большой продолжительности в районах хозяйственного освоения шельфа. На рисунке 1 показано их положение.

В таблице 1 приведены сведения о месте постановки станций: номер, глубина места, количество горизонтов измерений, время и продолжительность измерений. Дискретность измерений составила для отсчетов вектора скорости — 10 мин, для горизонтов — 2 м.

В настоящей статье дана обобщенная характеристика вектора скорости течений \vec{V} , выявлена зависимость \vec{V} от вертикальной координаты z и времени t , установлены черты сходства и различия скорости течений на этих 6 станциях.

Для обобщения исходных данных приняты вероятностные характеристики:

– плоский вектор математического ожидания $\vec{m}_V(z, t)$ с проекциями m_{v_1} на меридиан и m_{v_2} на параллель, модулем $|\vec{m}_V|$ и направлением φ ;

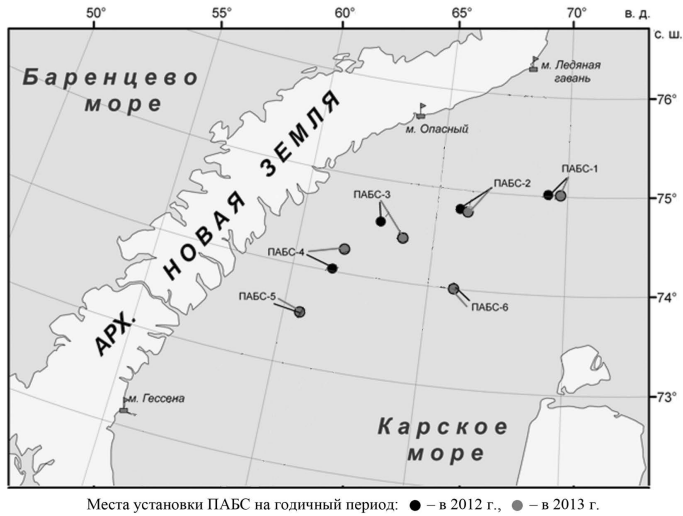


Рис. 1. Положение ПАБС в 2012–2013 гг.

Районы освоения шельфа, в которых были установлены ПАБС: ПАБС-1 — Рогозинская, ПАБС-2 — Нансена, ПАБС-3 — Университетская, ПАБС-4 — Викуловская, ПАБС-5 — Татариновская, ПАБС-6 — Матусевича

Fig. 1. SABS location in 2012–2013.

Areas offshore, which were installed SABS: ПАБС-1 — Rogozinskaya, ПАБС-2 — Nansena, ПАБС-3 — Universitetskaya, ПАБС-4 — Vikulovskaya, ПАБС-5 — Tatarinovskaya, ПАБС-6 — Matusевича

Таблица 1

Характеристика наблюдений за течениями

Номер станции	Глубина места, м	Количество горизонтов измерений	Время и продолжительность измерений
ПАБС-1	53	19 горизонтов от 7,1 до 43,1 м	Измерения с 15.08.2012 по 22.07.2013, 340 суток
ПАБС-2	195	29 горизонтов от 6,9 до 62,9 м	Измерения с 15.08.2012 по 22.07.2013, 340 суток
ПАБС-3	180	32 горизонта от 7,4 до 69,4 м	Измерения с 25.08.2012 по 23.07.2013, 332 суток
ПАБС-4	150	28 горизонтов от 6,7 до 60,7 м	Измерения с 26.08.2012 по 21.02.2013, 179 суток
ПАБС-5	245	29 горизонтов от 6,5 до 62,5 м	Измерения с 13.08.2012 по 20.07.2013, 340 суток
ПАБС-6	130	27 горизонтов от 6,0 до 58,0 м	Измерения с 14.08.2012 по 23.07.2013, 341 сутки

– диадный тензор дисперсии $D_{\vec{v}}(z, t)$,

– ковариационный тензор $K_{\vec{v}}(z, t, \tau)$,

– тензор спектральной плотности $S_{\vec{v}}(z, t, \omega)$,

где τ — временной сдвиг, ω — частота колебаний [1].

Инвариантами тензоров являются:

– линейный I_1 — сумма элементов на главной диагонали,

– индикатор вращения Θ — разность недиагональных элементов,

– оси эллипса λ_1, λ_2 [1].

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕЧЕНИЙ ПО СТАНЦИЯМ

Наиболее общую характеристику изменчивости течений дают оценки спектра и распределения вероятностей. Оценка $S_V(\omega)$ получена корреляционным методом при усечении коррелограммы $K_V(\tau)$ в точке $\tau_{max} = 3$ месяца (около 0,3 длины ряда).

Для выделения непериодической (без прилива) составляющей использовано скользящее осреднение на периоде 13 часов.

На рисунке 2 приведены графики инвариантов тензора $S_V(\omega)$ на верхнем и нижнем горизонтах.

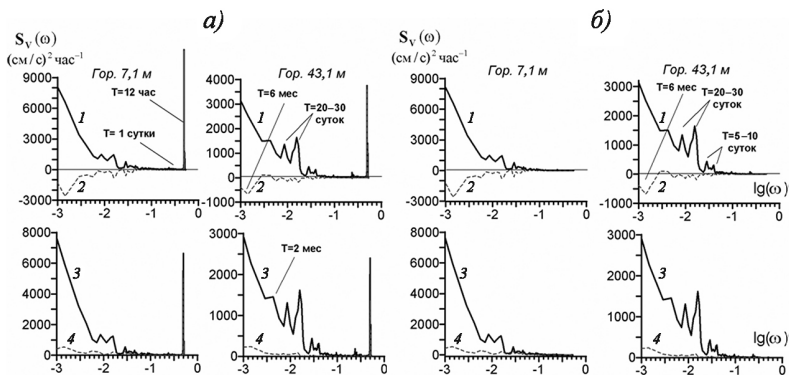


Рис. 2. Инварианты спектра: 1 — линейный $I_1(\omega)$, 2 — индикатор вращения $\vartheta(\omega)$, 3, 4 — полуоси эллипса $\lambda_{1,2}(\omega)$; а — суммарная скорость, б — непериодическая составляющая

Fig. 2. Spectrum invariants: 1 — linear $I_1(\omega)$, 2 — rotation indicator $\vartheta(\omega)$, 3, 4 — ellipse semiaxes $\lambda_{1,2}(\omega)$; а — summary speed, б — nonperiodical component

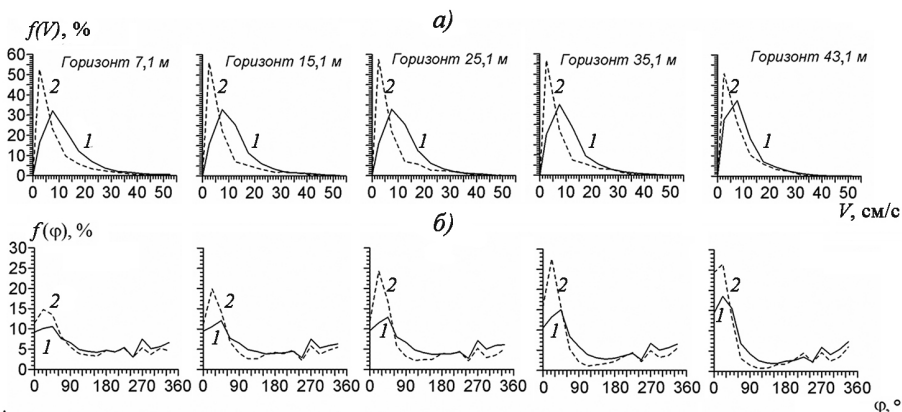


Рис. 3. Одномерная повторяемость скорости суммарного течения (1) и непериодической составляющей (2) по градациям модуля (а) и направления (б)

Fig. 3. One-dimensional frequency of the summary current speed (1) and nonperiodical component (2) according to gradations of modulus (а) and direction (б)

Знак индикатора вращения показывает, что в низкочастотном диапазоне с периодами колебаний более 10 суток преобладает вращение против часовой стрелки, так как $\vartheta(\omega) < 0$, а на частоте полусуточного прилива — вращение по часовой стрелке, так как $\vartheta(\omega) > 0$, а $\lambda_2(\omega) \neq 0$. Эта особенность приливов отмечена на всех 6 станциях.

Сильная вытянутость эллипсов рассеяния в низкочастотной области характерна для всех станций, кроме ПАБС-5.

Распределение по градациям модуля скорости $f(V)$ (рис. 3) одномодальное, у суммарного течения мода приходится на 5–10 см/с, а у непериодической составляющей на 1–5 см/с.

В распределении по румбам преобладает ССВ направление. Вторая мода $f(\varphi)$ (на 3-ЗСЗ) суммарных течений обусловлена приливом, у непериодической составляющей она отсутствует.

Эмпирические распределения скорости суммарных течений и непериодической составляющей $f(V)$ по форме близки к логарифмически нормальному закону распределения.

Значения \bar{V} , σ_V , V_{\max} , $I_1^{0.5}$, $\lambda_{1,2}$ уменьшаются с глубиной. Наибольшее ослабление максимальных скоростей течений V_{\max} происходит на глубинах 10–15 м, у остальных параметров изменение более равномерное. При этом у непериодической составляющей скорость изменения \bar{V} и V_{\max} заметно меньше, чем у суммарного течения. Значения основных параметров для суммарного течения и непериодического компонента составляют: $\bar{V} = 13,5\text{--}10,5$ и $8,5\text{--}7,8$ см/с; $\sigma_V = 9,5\text{--}7,0$ и $8,0\text{--}7,0$ см/с; $V_{\max} = 80\text{--}50$ и $70\text{--}45$ см/с; $I_1^{0.5} = 12,5\text{--}9,5$ и $10,0\text{--}8,0$ см/с. Распределение дисперсии по направлениям неравномерное. Согласно рисунку 4 эллипсы непериодического компонента вытянуты

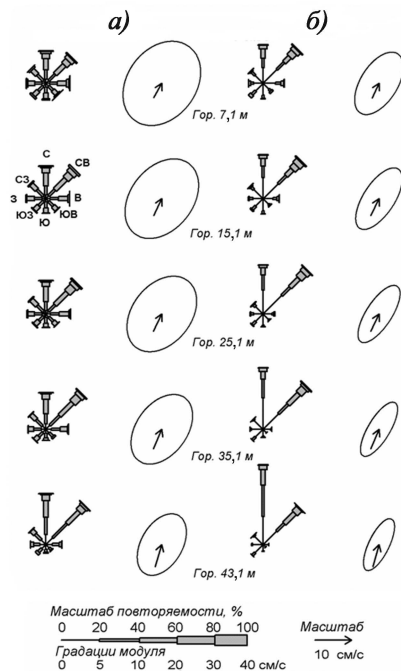


Рис. 4. Характеристики распределения вероятностей скорости течения и его моментов: розы повторяемости (%) и совмещенные векторы средней скорости и эллипсов СКО суммарного течения (а) и непериодической составляющей (б)

Fig. 4. Probability distribution characteristics of current speed and its quantiles: frequency roses (%) and combined vectors of mean speed and ellipses of MRSD of summary current (a) and nonperiodical component (b)

ты значительно сильнее, чем эллипсы суммарного течения. Значение χ уменьшается с глубиной от 0,75 до 0,6 и от 0,55 до 0,35.

Корреляция между течениями на различных горизонтах обусловлена совместными однонаправленными флуктуациями коллинеарных составляющих \vec{V} , то есть $r_{\perp} \cong 0$, $r_{\uparrow\downarrow} \cong \mu$ [2].

Таблица 2

Матрица индикатора общей векторной корреляции

Горизонт, м	7,1	13,1	19,1	21,1	31,1	37,1	43,1	7,1	13,1	19,1	21,1	31,1	37,1	43,1
	Суммарное течение							Неприливная составляющая						
7,1	1	0,91	0,87	0,82	0,76	0,71	0,64	1	0,96	0,93	0,89	0,85	0,81	0,76
13,1	-	1	0,97	0,91	0,86	0,80	0,72	-	1	0,98	0,95	0,91	0,87	0,82
19,1	-	-	1	0,96	0,90	0,84	0,76	-	-	1	0,98	0,94	0,90	0,85
25,1	-	-	-	1	0,95	0,88	0,79	-	-	-	1	0,98	0,94	0,89
31,1	-	-	-	-	1	0,95	0,86	-	-	-	-	1	0,98	0,93
37,1	-	-	-	-	-	1	0,93	-	-	-	-	-	1	0,97
43,1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1

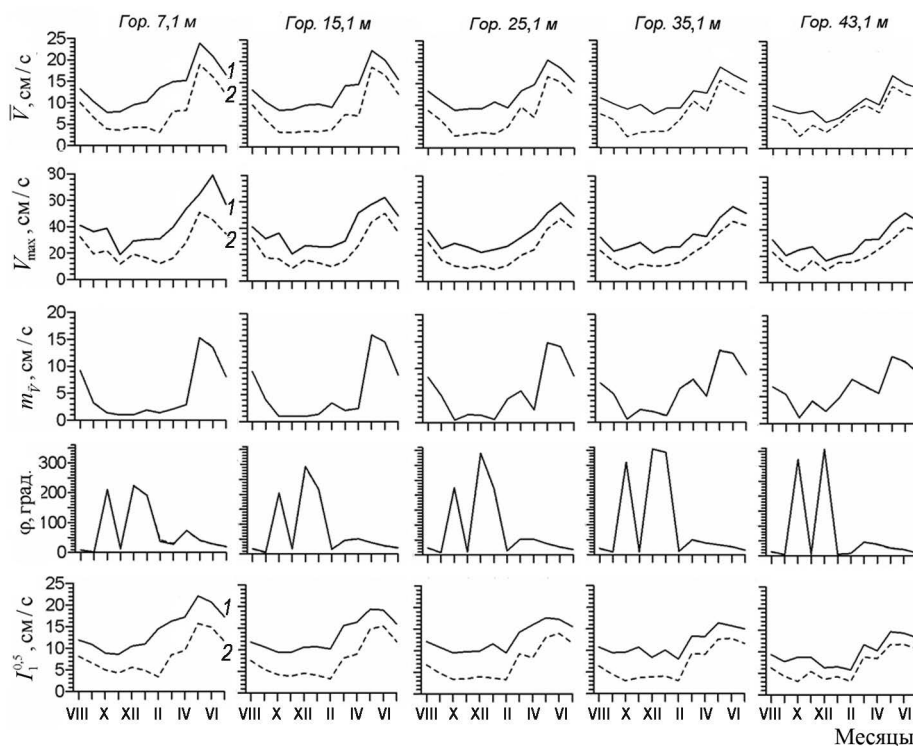


Рис. 5. Годовой ход средней скалярной скорости, максимума, модуля и направления среднего вектора и полного среднеквадратического отклонения суммарного течения (1) и неперифодической составляющей (2) на верхнем, нижнем и трех промежуточных горизонтах

Fig. 5. Annual course of mean scalar speed, maximum, modulus and direction of mean vector and full mean root square deviation of summary current (1) and nonperiodical component (2) at upper, lower and three intermediate horizons

Моменты распределения: средняя скалярная скорость \bar{V} , максимум V_{\max} , модуль $m_{\bar{v}}$ и направление φ среднего вектора, полное среднеквадратическое отклонение $I_1^{0,5}$, вытянутость χ и ориентация α эллипса СКО, коэффициент вариации v .

В корреляционных матрицах (таблица 2) использован только индикатор общей корреляции μ и ограниченное количество горизонтов.

Годовой ход характеристик изменчивости скорости течения по месяцам описан в терминах моментов распределения. На рисунке 5 показаны графики годового хода средней скалярной и максимальной скорости, модуля и направления среднего вектора и полного векторного СКО.

В зависимости от сезона переход от месяца к месяцу может быть как относительно плавным, так и скачкообразным. При этом на всех глубинах характер годового хода качественно одинаков и во все месяцы сохраняется отмеченная ранее закономерность — примерно однонаправленное изменение параметров изменчивости с глубиной.

На рисунке 6 совмещены векторы $\bar{m}_{\bar{v}}$ и эллипсы $\sigma_{\bar{v}}$ по месячным сериям наблюдений.

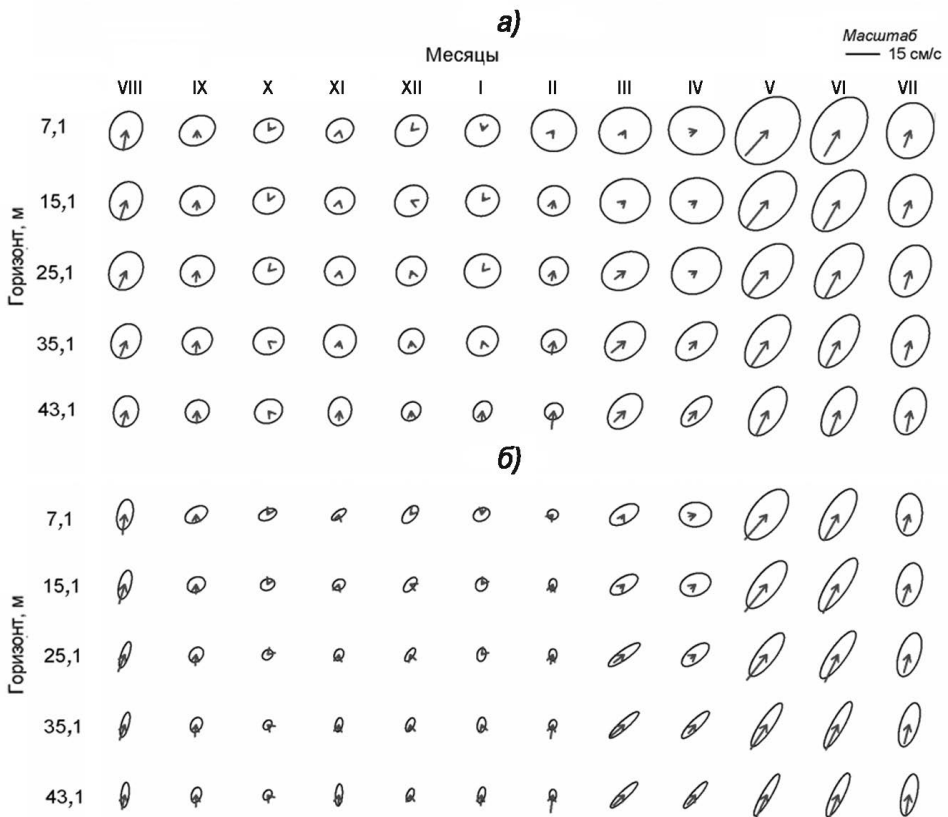


Рис. 6. Векторы средней скорости и эллипсы СКО суммарного течения (а) и непериодической составляющей (б) по месяцам

Fig. 6. Vectors of mean speed and ellipses of MRSD of summary current (a) and nonperiodical component (b) by months

Они показывают на всех горизонтах увеличенные значения \bar{V} , σ_v , V_{\max} , $I_1^{0,5}$ с апреля по сентябрь (с максимумом в мае) и пониженные значения с сентября–октября по февраль–март (и минимумом в октябре–феврале). Наиболее сильные изменения происходят от апреля к маю и от августа–сентября к октябрю. Направление φ среднего вектора $\bar{\mathbf{m}}_v$ и ориентация α эллипса СКО σ_v (на ССВ) в месяцы со значительными скоростями и изменчивостью стабильны и близки друг к другу, а отдельные выбросы отмечены только в месяцы с малыми значениями модуля $m_{\bar{v}}$ и резко ослабленными значениями \bar{V} и V_{\max} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На стадии разведочного анализа этих многомерных (по количеству горизонтов и по продолжительности) исходных данных удалось установить, что характерная особенность реализаций скорости течений в Карском море — это наличие годовой и приливной ритмик, а также межсезонной, синоптической и мелкомасштабной изменчивости.

Оценки скоростей течений демонстрируют практически одинаковый характер изменчивости на всех ПАБС по всем параметрам. Это проявляется в числовых значениях основных параметров изменчивости, форме профилей их вертикального распределения, эволюции этих профилей в годовом ходе и в соотношениях характеристик суммарного течения и его непериодической составляющей. На всех шести ПАБС на всех глубинах средние течения направлены на С-ССВ-СВ, а значения средней скалярной скорости суммарного течения и максимума на верхних горизонтах изменяются в относительно узких пределах 10,5–1,5 см/с и 65–80 см/с соответственно. Для вертикального распределения характерно уменьшение с глубиной величин самих скоростей и их изменчивости при сохранении направления среднего переноса и относительной близости к нему направления максимальной изменчивости. Годовой ход хорошо выражен и проявляется в увеличении весной и летом скоростей течения и их изменчивости при одновременном усилении вертикальных контрастов. Изменчивость непериодического течения на всех глубинах и соответствующие вертикальные контрасты ослаблены сравнительно с суммарным течением, а форма эллипсов СКО более вытянутая.

Для выполнения конформаторного (подтверждающего) анализа этих данных необходимо задать модель вида

$$\vec{V}(t, z) = \sum_k a_k(t) \vec{\varphi}_k(z) \quad \text{или} \quad \vec{V}(t, \vec{r}) = \sum_k \vec{a}_k(t) \varphi_k(\vec{r}),$$

где $\varphi(\cdot)$ — базисные функции, $a(\cdot)$ — коэффициенты.

В пределах этой статьи это нецелесообразно, но, безусловно, необходимо рассмотреть в следующей статье, проведя совместный анализ разложения системы временных рядов скорости течения по базисным естественным ортогональным функциям и векторным естественным ортогональным функциям [3–8].

Благодарности. Исследования выполнены в рамках инновационной деятельности ПАО «НК «Роснефть»».

Acknowledgments. The research was carried out within the framework of innovative activities of PJSC “NK “Rosneft”».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочин Н.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 425 с.
2. Иванов Н.Е. О характеристиках корреляции скоростей ветра, морских течений и дрейфа льда // Метеорология и гидрология. 2004. № 8. С. 61–72.
3. Мещерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.И., Яковлева Н.И. Естественные составляющие метеорологических полей. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 200 с.
4. Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 264 с.
5. Зубакин Г.К. Крупномасштабная изменчивость состояния ледяного покрова морей Северо-Европейского бассейна. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 160 с.
6. Методическое письмо по вероятностному анализу векторных временных рядов скоростей течения и ветра / Под ред. В.А. Рожкова. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 61 с.
7. Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. и др. Вертикальная структура течений в Финском заливе // Изв. РГО. 2013. Т. 145. Вып. 4. С. 24–43.
8. Рожков В.А., Сухих Н.А. Типизация эпюр вертикального распределения скорости морских течений в Финском заливе Балтийского моря // Изв. РГО. 2014. Т. 146. Вып. 4. С. 24–38.

REFERENCES

1. Kochin N.E. *Vektorny analiz i nachala tenzornogo ischisleniia*. Vector analysis and basics of tensor calculus. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1961: 425 p. [In Russian].
2. Ivanov N.E. Correlation characteristics of wind, sea currents, and ice drift. *Meteorologiya i gidrologiya*. Russian Meteorology and Hydrology. 2004, 8: 61–72. [In Russian].
3. Meshcherskaia A.V., Rukhovets L.V., Iudin M.I., Iakovleva N.I. *Estestvennye sostavliaiushchie meteorologicheskikh polei*. Natural components of meteorological fields. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970: 200 p. [In Russian].
4. Belyshev A.P., Klevantsov Yu.P., Rozhkov V.A. *Veroiatnostnyi analiz morskikh techenii*. Probability analysis of sea currents. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1983: 264 p. [In Russian].
5. Zubakin G.K. *Krupnomasshtabnaia izmenchivost' sostoiianiia ledianogo pokrova morei Severo-Evropetskogo basseina*. A large-scale variability of the ice cover of the North-European basin seas. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1987: 160 p. [In Russian].
6. *Metodicheskoe pis'mo po veroiatnostnomu analizu vektornykh vremennykh riadov skorostei techeniia i vetra*. Methodological letter on probability analysis of vector time series of current and wind speeds. Ed.: V.A. Rozhkov. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984: 61 p. [In Russian].
7. Klevantsov Yu. P., Rozhkov V.A., Smirnov K.G., Sukhikh N.A. Vertical structure of currents in the Gulf of Finland. *Izvestiia RGO*. Proceedings of the Russian Geographical Society. 2013, 145, 4: 24–43. [In Russian].
8. Rozhkov V.A., Sukhikh N.A. Typing of the vertical distribution of the sea current velocity in the Gulf of Finland. *Izvestiia RGO*. Proceedings of the Russian Geographical Society. 2014, 146, 4: 24–38. [In Russian].