

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ

д-р физ.-мат наук В.А. РОЖКОВ², аспирант Н.А. СУХИХ^{1,2}

¹ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: suhih.natalya@mail.ru

² — Санкт-Петербургский государственный университет, e-mail: varozhk@gmail.com

Обсуждаются результаты вероятностного анализа измерений скоростей течений продолжительностью с сентября 2001 по октябрь 2003 г., выполненные синхронно на двух станциях на серии горизонтов в Печорском море.

Массив данных скоростей течений проанализирован в нестационарных приближениях: периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП) в диапазоне сезонной изменчивости (с периодом коррелированности 1 год) и полипериодически коррелированных случайных процессов (ППКСП) в диапазоне приливных явлений (с периодами коррелированности, равными лунным и солнечным суткам и полусуткам с учетом месячных, полумесячных и долгопериодных неравенств). Также приводятся результаты анализа течений в диапазоне синоптической изменчивости в квазистационарном приближении после фильтрации (исключения годовой и суточной цикличности).

Ключевые слова: скорость течений, нестационарное приближение, периодически коррелированный случайный процесс, полипериодически коррелированный случайный процесс, приливная ритмика, сезонная изменчивость.

ВВЕДЕНИЕ

С сентября 2001 по октябрь 2003 г. в Печорском море были выполнены измерения течений от поверхности до дна на двух станциях, расстояние между которыми 118 км.

Полученный массив исходных данных был проанализирован А.В. Нестеровым векторно-алгебраическим методом (Белышев и др., 1983) в квазистационарном приближении (Нестеров, 2005). На основе графика спектральной плотности (рис. 4, Нестеров, 2005) им было показано, что скорость течения обладает низкочастотной (сезонной), синоптической (межсуточной) и приливной (внутрисуточной) изменчивостью. Основные статистические характеристики течений на двух станциях, полученные в квазистационарном приближении, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Оценки модуля и направления средней скорости течений и инвариантов тензора СКО (станция 1, 16.09.2001 – 25.10.2003; станции 2, 17.09.2001 – 31.10.2003) (Нестеров, 2005)

Горизонт	Станция 1						Станция 2					
	\bar{m}_r , см/с	φ°	$\sqrt{I_1}$, см/с	α°	$\sqrt{\chi}$	r	\bar{m}_r , см/с	φ°	$\sqrt{I_1}$, см/с	α°	$\sqrt{\chi}$	r
2	4,8	60	24,0	108	0,49	4,9	3,5	31	19,6	152	0,60	5,9
10	4,8	69	22,5	106	0,51	4,7	2,7	52	19,5	161	0,59	7,3
21/16	4,2	69	19,1	91	0,64	4,5	2,6	41	17,5	169	0,62	6,6

Согласно табл. 1 модуль средней скорости течений $|\bar{m}_r|$ имеет значения от 2,6 до 4,8 см/с и направления φ на северо-восток (от 30° до 70°), т.е. характеризует вынос вод в направлении «Поморский пролив — пролив Карские ворота». СКО скорости течений в 5–7 раз превышает средний перенос; эллипс СКО вытянут, т.к. малая ось примерно в два раза меньше большой оси; направление большой оси α отличается от φ , но держится около оси северо-запад–юго-восток.

С целью детализации поддиапазонного описания этой изменчивости в данной работе этот уникальный массив данных анализируется в приближении периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП) в диапазоне сезонной изменчивости и полипериодически коррелированных случайных процессов (ППКСП) в диапазоне приливных явлений (периоды коррелированности – лунные и солнечные сутки и полусутки с учетом месячных, полумесячных и долгопериодных неравенств) (Башмачников и др., 2001а; Башмачников и др., 2001б; Иванов, Рожков, 2005).

ГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЙ

На рис. 1 представлена векторная диаграмма среднемесячных математических ожиданий значений скоростей течений $\bar{m}_r(t)$ на горизонте 2 м. Огибающая векторов скорости течения от месяца к месяцу описывает на графике несколько петель, что свидетельствует о сложности годового хода скорости течений в исследуемом районе. Аналогичные по сложности графики характерны для других горизонтов и на второй станции.

В работе (Горелик, 1959) показано, что при суперпозиции двух взаимно перпендикулярных линейно поляризованных синхронных гармонических колебаний возникает эллиптически поляризованное колебание. Таким образом, суперпозиция проекций вектора скорости течения

$$v_u = A_u \cos(\omega t - \psi_u) \text{ и } v_v = A_v \cos(\omega t - \psi_v)$$

является эллипсом, формулы расчета параметров которого представлены в монографии (Рожков, 1996).

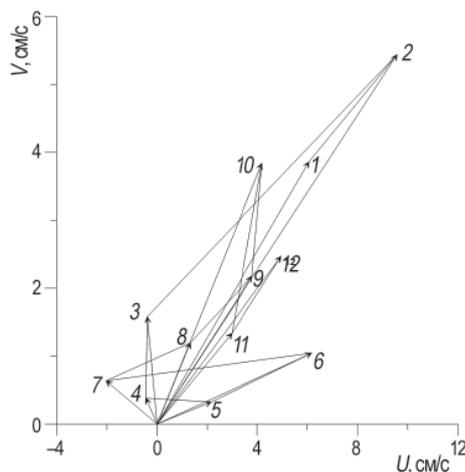


Рис. 1. Векторная диаграмма среднемесячных значений скорости течений на горизонте 2 м на станции 1, где горизонтальной осью является проекция течения на параллель в направлении восток u , а вертикальной проекция на меридиан в направлении север — v ; числами обозначены номера месяцев, начиная с октября 2001 г.

Обозначим символами значения большой L_1 и малой L_2 осей эллипса, угла наклона α большой оси относительно географической системы координат, а также знака обхода эллипса годовой гармонике и ее обертонов $\vartheta_k(t_1, t_2) = A_u A_v \sin[(t_2 - t_1)/T] \sin(\psi_u - \psi_v)$ по часовой (+) или против часовой (-) стрелки.

В табл. 2 приведены указанные выше характеристики, а также среднегодовые значения проекций (m_u, m_v) (Рожков, 1996), а модуль вектора $|\vec{m}_v|$ вычисляется через проекции (m_u, m_v) . Значения параметров математического ожидания, амплитуд гармоник и полуосей эллипса даны в см/с.

Таблица 2

Параметры разложения кривой годового хода вектора скорости течений в виде ПКПС

Гармоника	Среднегодовое			Математическое ожидание							
	m_u	m_v	$ \vec{m}_v $	A_u	A_v	Ψ_u	Ψ_v	$L_1/2$	$L_2/2$	α°	Знак
Станция 1 (2001–2002)											
Годовая (2 м)	2,99	2,04	3,62	0,71	0,61	307	318	0,92	0,21	41	–
Полугодовая (2 м)				0,55	0,55	214	171	0,53	0,49	215	+
Третьгодовая (2 м)				1,84	0,69	126	115	1,62	1,12	20	+
Годовая (10 м)	3,75	1,78	4,16	0,96	0,30	321	312	0,95	0,35	17	+
Полугодовая (10 м)				0,65	0,42	167	165	0,65	0,22	33	+
Третьгодовая (10 м)				2,22	0,70	139	132	1,74	1,55	17	+
Годовая (21 м)	3,09	1,98	3,67	0,90	0,39	306	211	0,90	0,40	357	+
Полугодовая (21 м)				0,48	0,24	183	104	0,38	0,32	7	+
Третьгодовая (21 м)				1,84	0,77	145	152	1,66	1,12	23	–
Станция 1 (2002–2003)											
Годовая (2 м)	5,21	2,81	5,92	1,87	0,64	187	296	1,72	0,97	353	–
Полугодовая (2 м)				2,00	0,57	31	70	1,84	0,85	13	–
Третьгодовая (2 м)				0,15	0,97	340	115	0,88	0,44	6	–
Годовая (10 м)	5,07	1,74	5,36	1,85	0,41	205	219	1,89	0,18	12	–
Полугодовая (10 м)				1,89	0,36	39	45	1,80	0,59	11	–
Третьгодовая (10 м)				0,52	0,35	91	128	0,59	0,22	32	–
Годовая (21 м)	4,37	1,04	4,49	1,68	0,64	207	169	1,75	0,43	18	+
Полугодовая (21 м)				1,47	0,89	41	26	1,58	0,60	31	+
Третьгодовая (21 м)				0,51	0,31	86	87	0,60	0,04	31	–

Из таблицы видно, что такой способ параметризации дает возможность сопоставить между собой структурные особенности течений как между станциями, так и по вертикали. Наибольший вклад в изменчивость вносит гармоника с периодом четыре месяца в 2001–2002 гг. и гармоники с периодами год и полгода в 2002–2003 гг., что можно объяснить географическим положением станций и различием метеорологических, гидрологических и ледовых условий.

Район исследования находится под воздействием реки Печоры, которая определяет гидрологический режим данной акватории, а также характеризуется сложными ледовыми условиями (наличием льда, аномальных ледяных образований) 7–9 месяцев в году.

Период 2002–2003 гг. характеризовался аномальными ледовыми условиями, наблюдалось сокращение площади ледяного покрова акватории в феврале–июле по

сравнению со средними многолетними значениями (Zubakin et al., 2015), влияние ледяного покрова на течения в этот год не было доминирующим. Аналогичная ситуация наблюдается и на станции 2, где гармоника с периодом 4 месяца преобладает в 2001–2002 гг., но в 2002–2003 гг. ее вклад значительно меньше, чем гармоник с периодами год и полгода.

ПРИЛИВНАЯ РИТМИКА СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЙ

Основной особенностью Печорского моря является наличие интенсивных приливных течений. Обычно в практических задачах ограничиваются расчетами параметров 4 суточных (K_1, P_1, O_1, Q_1), 4 полусуточных (M_2, S_2, N_2, K_2) и 4 мелководных волн (MS_4, M_4, S_4, M_6).

В табл. 3 приведены оценки амплитуд (A_u, A_v) и фаз (Ψ_u, Ψ_v) гармонических постоянных основных приливных гармоник проекций скорости течений, вычисленные по реализации месячной продолжительности по методу МНК (Войнов, 1999). Мелководные гармоники вносят незначительный вклад и в таблице не представлены.

Согласно табл. 3, характеризующей приливную ритмику течений одного месяца (август 2002 г.), полусуточные гармоники превышают суточные, гармоника M_2 преобладает над остальными, гармонические постоянные приливных течений меняются по вертикали (между горизонтами) и по горизонтали (между станциями).

Этот пример иллюстрирует тот факт, что внутренние волны приливных периодов не обязательно обусловлены только потенциалом приливообразующих сил (Марчук, Каган, 1977; Поверхностные..., 2002; Рожков, 2013; Рожков, 2015;), но существенно зависят от стратификации вод и рельефа дна.

Согласно (Рожков, 2013; Рожков, 2015; Рожков, 1996) гармонические постоянные являются случайными величинами (не константами) и для них допустимо описание через вероятностные характеристики ППКСП, такие, как математическое ожидание $\bar{m}_v(t)$ и дисперсия $D_{\bar{v}}(t)$.

Яркой иллюстрацией сложности приливных течений являются диаграммы суточного хода скорости течений в августе 2002 г. на трех горизонтах (2, 10, 21 м) станции 1, представленные на рисунке 2а. Из рис. 2а следует, что, проведя кривую, соединяющую концы векторов $\bar{m}(t)$ по последовательности номеров часов, получим

Таблица 3

Оценки амплитуд (A_u, A_v) и фаз (Ψ_u, Ψ_v) проекций скорости течений, вычисленные для августа 2002 г.

Гармоника	A_u	A_v	Ψ_u	Ψ_v	A_u	A_v	Ψ_u	Ψ_v
	Станция 1				Станция 2			
	2 м				2 м			
M_2	22,04	15,99	252	95	13,17	22,05	262	114
S_2	7,32	5,17	338	178	5,71	5,15	18	233
N_2	5,43	2,83	242	92	2,89	5,30	144	65
K_2	1,99	1,41	1	201	1,55	1,40	40	256
K_1	0,71	4,02	15	101	2,27	3,58	332	146
P_1	0,24	1,33	22	108	0,75	1,19	339	153
O_1	0,91	1,20	170	17	1,21	1,78	133	9
Q_1	0,86	0,88	172	65	0,48	1,45	2	340

Окончание табл. 2

Гармоника	A_u	A_v	Ψ_u	Ψ_v	A_u	A_v	Ψ_u	Ψ_v
	см/с	см/с			см/с	см/с		
	Станция 1				Станция 2			
	10 м				10 м			
M ₂	20,80	15,64	251	92	9,67	13,31	310	106
S ₂	6,02	4,42	343	171	1,03	5,10	272	181
N ₂	4,54	4,06	225	66	5,06	2,76	290	153
K ₂	1,64	1,20	6	193	0,28	1,39	294	204
K ₁	0,93	3,78	4	101	2,42	3,42	296	143
P ₁	0,31	1,25	11	108	0,80	1,13	303	150
O ₁	0,71	0,69	158	3	1,56	0,22	220	116
Q ₁	0,24	0,49	106	208	0,53	1,02	68	309
	21 м				16 м			
M ₂	9,67	12,45	274	30	9,82	10,93	330	88
S ₂	3,00	3,83	352	119	1,90	2,98	79	167
N ₂	3,33	1,68	282	8	2,86	1,52	291	110
K ₂	0,82	1,04	15	141	0,52	0,81	102	189
K ₁	2,41	3,32	329	106	2,32	2,48	321	144
P ₁	0,80	1,10	336	113	0,77	0,82	328	151
O ₁	1,03	1,36	146	317	1,61	0,45	235	189
Q ₁	0,19	1,03	249	180	0,44	0,56	90	309

кривую из семейства фигур Лиссажу (Горелик, 1959), которая отличается от эллипса, но может быть представлена суммой последовательности векторных гармоник. На рисунке 2б представлены эллипсы приливных гармоник, которые вносят основной вклад во внутрисуточную изменчивость течений.

В табл. 4 на примере одного месяца (август 2002 г.), одного горизонта (2 м) и одной станции приведены оценки вероятностных характеристик $\vec{m}_v(t)$, $D_v(t)$ векторного ПКСП с периодом коррелированности 24 ч, интервалом дискретности $\Delta=1$ ч, длиной реализации $\theta=31$ сут., а также с периодами коррелированности 12 ч и 8 ч. В таблице приведены значения модуля вектора математического ожидания в см/с и его направления φ , а также основные характеристики дисперсии по векторно-алгебраическому методу (линейный инвариант тензора дисперсии I_1 в см²/с², коэффициент вариации r и параметры эллипса СКО: наклон главной полуоси эллипса к географической системе координат α и параметр вытянутости эллипса $\sqrt{\chi}$).

Строки обертонов (с периодами 12 ч и 8 ч) суточной гармоники даны как повторы их значений, хотя для построения вероятностной модели требуется учесть фазовый сдвиг.

На рис. 3 по данным табл. 4 приведены графики внутрисуточных изменений регулярного компонента суточного хода $\vec{m}_v(t)$ и стохастического компонента через инварианты тензора СКО скорости течений.

Напомним, что в этой статье термин эллипс как геометрическая кривая второго порядка используется в двух функциональных пространствах: временном (график последовательности значений $\vec{m}_v(t)$ с суточной или годовой ритмикой) и вероятностном (изображение тензора СКО векторного процесса $\vec{V}(t)$).

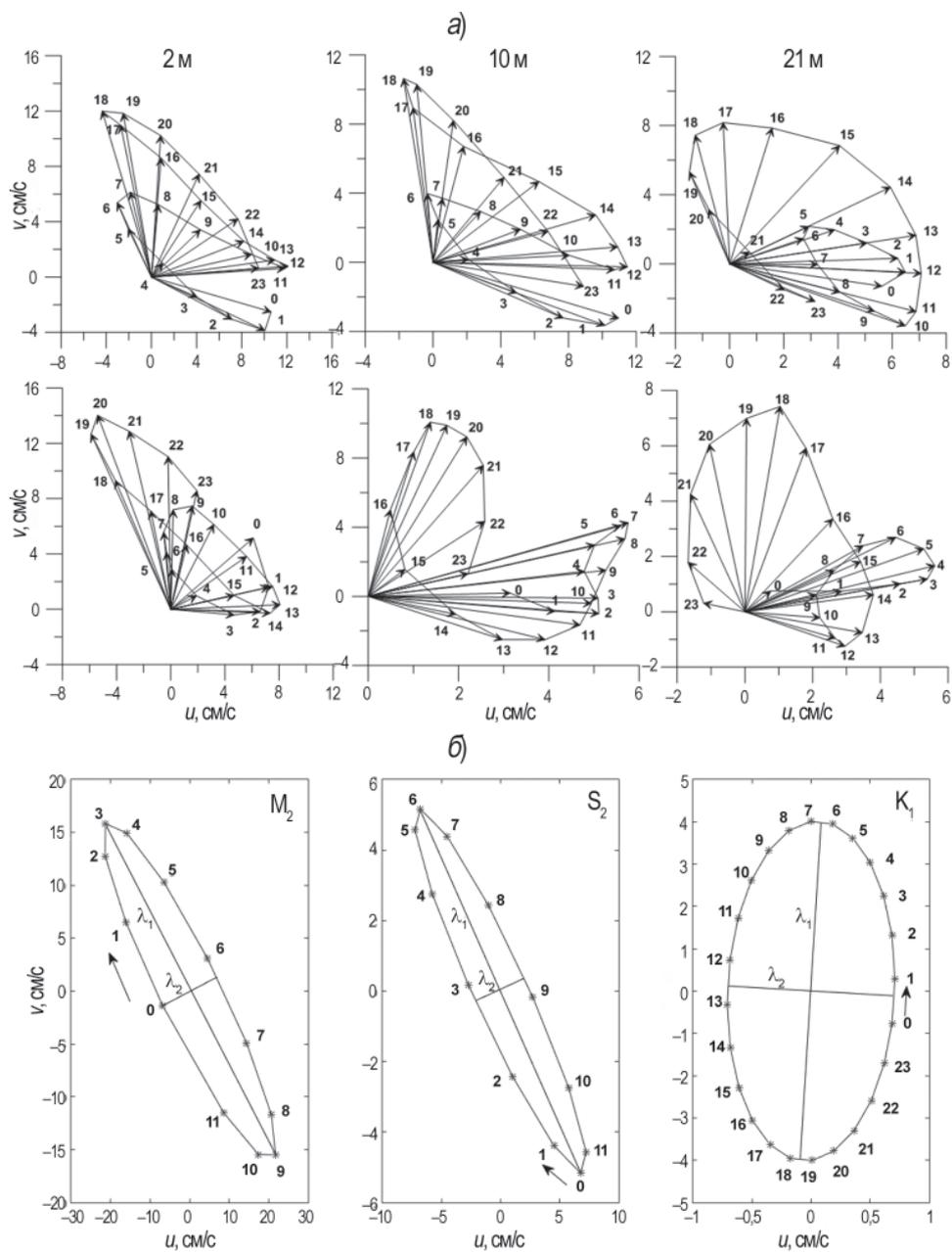


Рис. 2. Диаграммы суточного хода в августе 2002 г. на 1-й станции и трех горизонтах (2, 10, 21 м) (а) и эллипсы приливных течений для M_2 , S_2 и K_1 для горизонта 2 м 1-й станции (б). Цифрами обозначены часы.

Результаты анализа изменчивости гармонических постоянных и рассмотрение приливных течений как векторных ПКСП и ППКСП привели к необходимости создать классификацию приливных течений как векторных случайных процессов.

Таблица 4

Оценки вероятностных характеристик $\bar{m}_v(t)$, $D_v(t)$ векторного ПКСП с периодом коррелированности 24, 12 и 8 ч

Час	T = 24 ч						T = 12 ч						T = 8 ч					
	$\bar{m}_v(t)$	φ°	$\sqrt{I_1}$	r	$\sqrt{\chi}$	α°	$\bar{m}_v(t)$	φ°	$\sqrt{I_1}$	r	$\sqrt{\chi}$	α°	$\bar{m}_v(t)$	φ°	$\sqrt{I_1}$	r	$\sqrt{\chi}$	α°
0	10,89	103	24,4	2,2	0,37	-62	11,39	94	25,4	2,2	0,36	-63	5,51	47	23,7	4,3	0,41	-60
1	10,77	111	24,3	2,3	0,37	-60	10,57	97	24,8	2,3	0,37	-61	5,23	48	24,0	4,6	0,38	-58
2	7,76	113	22,7	2,9	0,39	-61	7,66	92	23,7	3,1	0,38	-61	5,24	48	24,6	4,7	0,37	-57
3	4,30	110	22,3	5,2	0,39	-60	4,68	64	23,2	5,0	0,40	-60	5,77	51	24,7	4,3	0,40	-58
4	1,42	45	22,3	15,7	0,43	-56	4,89	11	23,4	4,8	0,42	-57	6,13	49	24,2	3,9	0,43	-59
5	4,06	330	21,8	5,4	0,46	-59	7,63	342	23,4	3,1	0,42	-57	5,96	47	23,6	4,0	0,44	-61
6	6,17	331	22,6	3,7	0,46	-65	9,44	337	24,2	2,6	0,42	-59	5,89	46	23,5	4,0	0,43	-64
7	6,41	343	22,5	3,5	0,47	-65	9,24	346	23,6	2,6	0,46	-57	5,73	44	23,4	4,1	0,41	-64
8	5,28	6	22,2	4,2	0,45	-59	7,77	5	23,0	3,0	0,47	-57						
9	5,52	52	22,9	4,1	0,38	-59	6,91	38	23,2	3,4	0,44	-61						
10	9,01	80	25,4	2,8	0,34	-58	8,76	71	24,4	2,8	0,40	-62						
11	11,84	87	26,8	2,3	0,37	-61	10,68	87	25,3	2,4	0,37	-64						
12	12,14	86	26,3	2,2	0,35	-63												
13	11,00	84	25,3	2,3	0,36	-61												
14	8,58	72	24,6	2,9	0,37	-60												
15	7,05	38	24,1	3,4	0,41	-60												
16	8,65	6	24,4	2,8	0,42	-58												
17	11,31	346	24,9	2,2	0,39	-55												
18	12,77	340	25,7	2,0	0,37	-55												
19	12,10	348	24,7	2,0	0,43	-52												
20	10,26	5	23,7	2,3	0,49	-56												
21	8,55	30	23,5	2,7	0,50	-63												
22	8,74	61	23,3	2,7	0,45	-68												
23	9,52	86	23,7	2,5	0,36	-66												

А.И. Дуванин (1960) классифицирует приливные явления по показателю характера приливов $\kappa = (H_{K_1} + H_{O_1}) / H_{M_2}$ через отношение амплитуд основных гармонических составляющих. Для полусуточных приливов $0 < \kappa < 0,5$; для смешанных приливов: неправильные полусуточные $0,5 < \kappa < 2,0$, неправильные суточные $2,0 < \kappa < 4,0$; для суточных приливов $4,0 < \kappa$. За классифицирующую переменную берет-

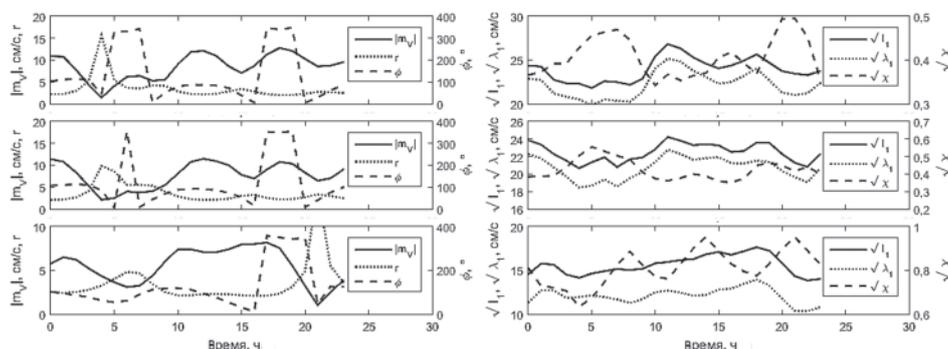


Рис. 3. Вектор математического ожидания и инварианты тензора СКО суточного хода за август 2002 г. в отдельные часы суток на станции 1 на 3 горизонтах (2, 10 и 21 м).

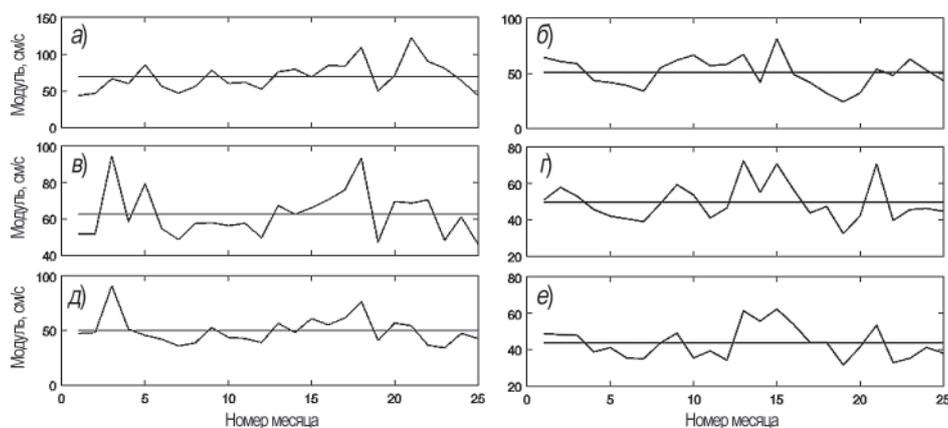


Рис. 4. Временные ряды модуля $\vec{V}_{\max}(t)$ на станциях 1 (а, в, д) и 2 (б, г, е) на горизонтах (2 (а, б), 10 (в, г) и 21 (д, е) м) с октября 2001 по октябрь 2003 г.

ся суточная ритмика приливных течений в виде векторной диаграммы средних за фиксированный месяц значений вектора скорости течений в фиксированный час, но согласно табл. 4 требуется учесть и СКО ежечасных значений (рис. 3).

А.А. Дмитриева (1963) для классификации использует максимальную скорость течения $\vec{V}_{\max}(t)$, характеризуемую модулем этого вектора, направлением γ и фазой τ . На рис. 4 приведены графики временных рядов модуля $\vec{V}_{\max}(t)$.

Из рис. 4 следует, что

- приливные движения на станции 1 и 2 во все сезоны года на всех горизонтах неоднородны;
- далеко не всегда экстремумы $|\vec{V}(t)|$ свыше 1 м/с можно объяснить сизигией прилива.

Исходя из модели ППКСП и сохраняя основные принципы классификаций А.И. Дуванина и А.А. Дмитриевой, новая классификация приливов должна базироваться на методе дисперсионного анализа (ДА) векторных периодически нестационарных случайных процессов. В работе (Иванов и др., 2006) изложены принципы классификации скалярных гидрометеорологических полей методом ДА. Разработка методов классификации векторных полей требует дальнейшего развития ДА.

СИНОПТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

Для изучения синоптической изменчивости течений отфильтруем годовой ход путем центрирования реализации $\vec{V}(t)$ на среднемесячные значения $\vec{m}_{\vec{V}}(t)$ конкретного года и будем анализировать в квазистационарном приближении только последовательность среднесуточных значений (для исключения приливной ритмики). После исключения годовой и суточной ритмики и сохранения на реализациях течений синоптических флуктуаций, их корреляционный и спектральный анализ в квазистационарном приближении позволяет увидеть на рис. 5, где представлены графики оценок инвариантов I_1 , θ ковариационного тензора $K_{\vec{V}}(\tau)$ и тензора спектральной плотности $S_{\vec{V}}(\omega)$, привычные закономерности синоптической изменчивости течений. Ковариационная функция имеет экспоненциально-косинусный вид, типичный для стационарного случайного процесса авторегрессии — скользящего среднего АРСС (2, 1), а график

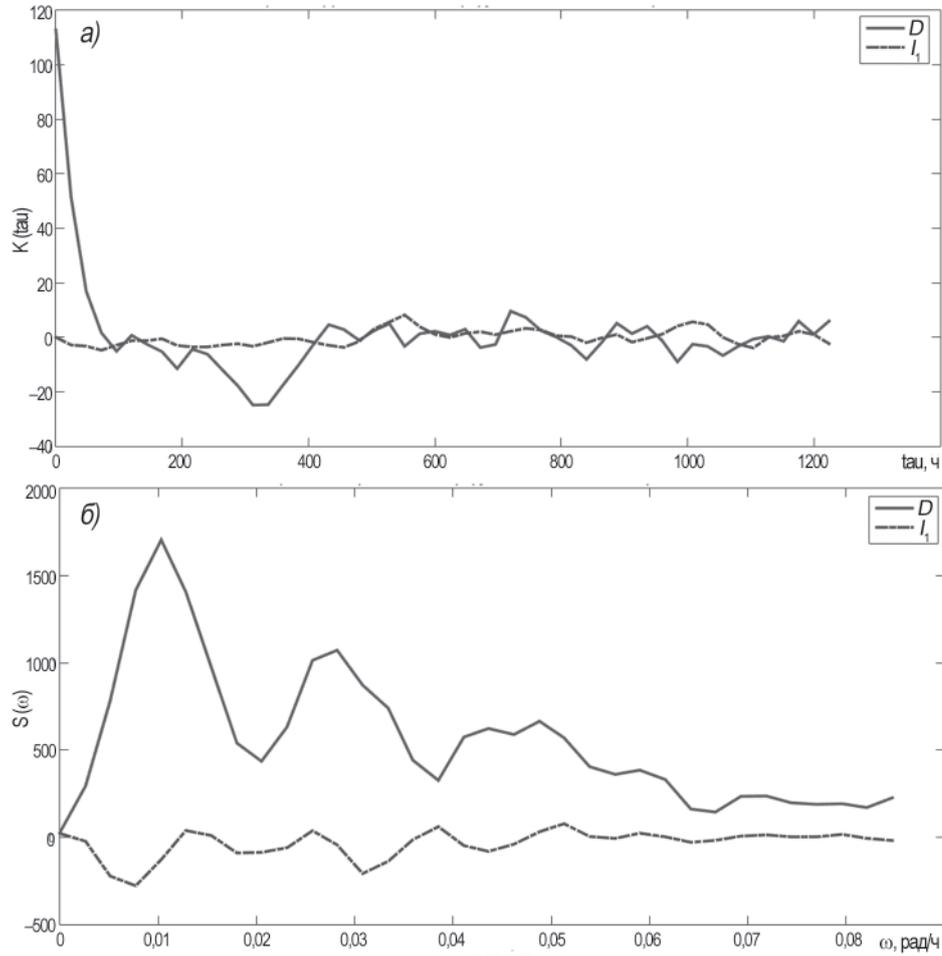


Рис. 5. Оценки инвариантов I_1 и θ ковариационного тензора $K_p(\tau)$ (а) и тензора спектральной плотности $S_p(\omega)$ (б) на станции 1 на горизонте 2 м.

Таблица 5

Оценки модуля и направления средней скорости течений и инвариантов тензора СКО для фильтрованного ряда данных с октября 2001 по сентябрь 2003 г.

Горизонт	\bar{m}_v , см/с	φ°	Станция 1						Станция 2							
			$\sqrt{I_1}$, см/с	$\sqrt{\lambda_1}$, см/с	$\sqrt{\lambda_2}$, см/с	α°	$\sqrt{\chi}$	r	\bar{m}_v , см/с	φ°	$\sqrt{I_1}$, см/с	$\sqrt{\lambda_1}$, см/с	$\sqrt{\lambda_2}$, см/с	α°	$\sqrt{\chi}$	r
2 м	0,10	30	13,4	12,0	6,0	85	2,0	139	0,21	241	8,8	8,5	2,4	42	3,6	42
10 м	0,05	135	12,9	10,7	7,2	79	1,5	252	0,22	279	9,9	9,0	4,1	28	2,2	45
21 м	0,08	216	11,7	9,9	6,2	68	1,6	151	0,19	295	9,7	8,7	4,2	17	2,1	50

линейного инварианта функции спектральной плотности имеет три выраженных максимума на периодах 26, 9 и 5 суток. В табл. 5 даны оценки модуля, направления средней скорости течений и инвариантов тензора СКО.

Модуль вектора математического уменьшается с глубиной на станции 1 и незначительно изменяется на станции 2. С глубиной средний вектор отклоняется на положительный угол вправо относительно его положения в поверхностном горизонте. Значения параметров дисперсии значительно превышают средние значения, коэффициент вариации много больше 1.

ВЫВОДЫ

1. Совместный анализ синхронных измерений течений на двух станциях в Печорском море позволил установить, что квазистационарное приближение [Нестеров, 2005] является первичным анализом, который позволил сфокусировать внимание на необходимости поддиапазонного анализа ансамбля временных рядов.

За основу этого анализа, следуя (Рожков, 2013; Рожков, 2015), принято

– изучение годовой и приливной ритмики течений в приближении ПКСП и ППКСП;

– фильтрация ритмических диапазонов изменчивости, в частности, через осреднение исходных данных за час, сутки, месяц, год;

– изучение в квазистационарном приближении в диапазонах синоптической и мелкомасштабной изменчивости течений;

– выявление пространственной (горизонтальной и вертикальной) неоднородности течений.

2. В диапазоне сезонной изменчивости течений наибольший вклад в дисперсию процесса вносит третьгодая гармоника, а в 2002–2003 гг. — годовая и полугодовая гармоники, что можно объяснить аномалиями ледяного покрова акватории.

3. Показано, что гармонические постоянные приливных течений не являются постоянными и меняются по вертикали (между горизонтами), по горизонтали (между станциями) и по времени. В этом случае для описания параметров внутренних приливных волн необходимо применение вероятностных характеристик и методов ППКСП.

Компонентный метод описания позволяет выделить постоянную и стохастическую части приливных гармоник (математическое ожидание и дисперсию), когерентный — рассмотреть внутрисуточную изменчивость течений.

4. Диапазон синоптической изменчивости рассмотрен в стационарном приближении после применения фильтрации приливной и сезонной ритмики. Полученные параметры корреляционных функций и функций спектральных плотностей характеризуют эту изменчивость как случайный процесс авторегрессии – скользящего среднего АРСС (2, 1).

Данная статья и по ее названию, и по содержанию направлена на обсуждение результатов вероятностного анализа натуральных данных, но ее авторы ставили перед собой задачу построить имитационную вероятностную модель течений в Печорском море с учетом главных влияющих факторов (приливообразующие силы, синоптические процессы, ледовый покров). Эта модель строится, исходя из рассмотрения приливного компонента как ППКСП, сезонной изменчивости — как ПКСП, а синоптической изменчивости — как АРСС (2, 1).

Вероятностная модель в квазистационарном приближении (Нестеров, 2005) не учитывает сезонной и приливной ритмики течений и имеет сложную спектральную структуру.

В то же время планируемая поддиапазонная модель изменчивости течений допускает детерминизм факторов (в среднем) и их стохастичность (через СКО), позволяет варьировать комбинациями параметров аппроксимации спектральной плотности случайного процесса и функции распределения вероятностей его значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баимачников И.Л., Бухановский А.В., Иванов Н.Е., Рожков В.А., Фукс В.Р.* Приливы как полипериодически коррелированный случайный процесс // Сборник докладов 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Современное состояние, проблемы навигации и океанографии» (НО-2001). Санкт-Петербург, 6–9 июня 2001. Т. 2. СПб., 2001а. С. 175–179.
- Баимачников И.Л., Иванов Н.Е., Рожков В.А.* Методы анализа приливных явлений в морях // Навигация и гидрография. 2001б. № 13. С. 151–169.
- Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А.* Вероятностный анализ морских течений. Л.: ГИМИЗ, 1983. 264 с.
- Войнов Г.Н.* Приливные явления в Карском море. СПб.: РГО, 1999. 110 с.
- Горелик Г.С.* Колебания и волны. М.: Физматлит, 1959. 572 с.
- Дмитриева А.А.* Методы расчета и предвычисления приливных течений. Л.: ЛГУ, 1963. 182 с.
- Драган Я.П., Рожков В.А., Яворский И.Н.* Методы вероятностного анализа ритмики океанологических процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 319 с.
- Дуванин А.И.* Приливы в море. Л.: ГИМИЗ, 1960. 390 с.
- Иванов Н.Е., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А.* Специфика дисперсионного анализа гидрометеорологических процессов и полей // Известия РГО. 2006. Т. 138. Вып. 5. С. 20–39.
- Иванов Н.Е., Рожков В.А.* Изменчивость приливо-отливных явлений // Навигация и гидрография. 2005. Т. 19. С. 100–110.
- Марчук Г.И., Каган Б.А.* Океанские приливы. Математические модели и численные эксперименты. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 296 с.
- Нестеров А.В.* Динамика вод и льдов в юго-восточной части Баренцева моря по данным автономных донных станций // Труды РАО. Международная конференция. Санкт-Петербург, 13–15 сентября 2005. СПб., 2005. С. 128–131.
- Поверхностные и внутренние волны в арктических морях. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 364 с.
- Рожков В.А.* Статистическая гидрометеорология. СПб.: СПбГУ, 2013. Ч. 1. 186 с.; 2013. Ч. 2. 215 с.; 2015. Ч. 3. 255 с.
- Рожков В.А.* Теория вероятностей случайных событий, величин и функций с гидрометеорологическими примерами. СПб.: «Прогресс-погода», 1996. 560 с.
- Zubakin G.K., Gudoshnikov Yu.P., Nesterov A.V., Sukhikh N.A.* Hydrometeorological and ice conditions in the Pechora Sea during the conduct of the experiment in 2001–2003 (part 1) // Proceedings International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'15), June 14–18, 2015, Tondheim, Norway. Curran Associations, 2015. P. 240–249.

V.A. ROZHKOV, N.A. SUKHIKH

VARIABILITY OF CURRENTS IN THE PECHORA SEA

The results of the probabilistic analysis of sea currents velocity ADCP measurements was collected from September 2001 to October 2003 simultaneously at two stations on series of horizons.

In present study the dataset is analyzed in non-stationary approximation in case of periodically correlated random processes (PCRP) in the range of seasonal variability (period of correlation 1 year) and polyperiodically correlated random processes (PPCRP) in the range of tidal variability (periods of correlation are lunar and solar days and half of these days with considering of monthly, semimonthly and the long-term inequalities). The results of the analysis are in the range of annual, tidal and synoptic sea currents variability in the quasi-stationary approximation after filtration (filtration of annual and diurnal cycles).

Keywords: sea current velocity, non-stationary approximation, periodically correlated random process, polyperiodically correlated random process, tidal rhythms, seasonal variability.