

Научная статья

УДК 521.937

DOI 10.46845/1997-3071-2022-67-115-128

Эволюции мгновенного положения полюса вращения Земли

Владимир Филиппович Дубравин¹, Олег Юрьевич Краснобородько²

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (АтлантНИРО), Калининград, Россия

¹ v_dubravin@mail.ru

² sea@atlantniro.ru

Аннотация. Исследование выполнено на однородных материалах многолетних массивов координат X и Y и результирующего вектора мгновенного положения Северного полюса вращения Земли (МПСПВЗ) (m) с дискретностью 0,05 г. за период 1890–2020 гг. [1] и 1 сут за период 1962–2020 гг. [2]. По временной модели [3], состоящей из следующих компонентов: межсуточной (синоптической) изменчивости (СИ), нерегулярной внутригодовой изменчивости (ВГИ), регулярного сезонного хода (СезХ) и межгодовой изменчивости (МГИ), получены оценки вкладов каждого вида колебаний в суммарную временную изменчивость. Показано, что максимальные вклады в дисперсию исходных рядов [1, 2] на интервале 1962–2020 гг. для всех параметров вносит ВГИ (54,3–61,4 %); удельный вклад СезХ значителен (19,1–27,3 %); вклад МГИ заметен (9,9–24,9 %); минимальный вклад приходится на СИ (1,0–1,7 %). При этом удельный вклад СИ при увеличении дискретности от суток до 18–19 сут уменьшается на 0,5–0,8 %, а относительная погрешность при замене ежесуточных данных на 18–19-суточные для вклада СИ составляет 33,6–43,9 %. Таким образом, удельный вклад СИ не может быть корректно использован для оценки вклада СИ. Поэтому рассмотрен внутригодовой ход удельного вклада и размаха СИ для всех параметров только для массива (M) [2]. При этом максимум в годовом ходе удельного вклада СИ для M наступает в декабре (3,7 %), а минимум – в июне (0,7 %). Внутригодовая изменчивость размаха СИ для всех параметров характеризуется полугодовой волной, при этом для M и Y максимумы наступают в феврале-марте и сентябре (1,3–1,4 м), минимумы – в июне и декабре (0,1–0,2 м), для X максимумы – в июне (1,5 м) и декабре (1,4 м) и минимумы – в марте (0,3 м) и сентябре (0,4 м).

Ключевые слова: структура временного ряда, внутригодовая и межгодовая изменчивость, параметры мгновенного положения полюса вращения Земли, дисперсионный, гармонический, корреляционный анализ

Благодарности: авторы выражают благодарность А. В. Смирнову за помощь в обработке данных; работа выполнена в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE -2021-0012)

Для цитирования: Дубравин В. Ф., Краснобородько О. Ю. Эволюции мгновенного положения полюса вращения Земли // Известия КГТУ. 2022. № 67. С. 115–128. DOI: 10.46845/1997-3071-2022-67-115-128.

Original article

Evolution of the Earth rotation pole position

Vladimir F. Dubravina¹, Oleg Yu. Krasnoborod'ko²

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Russian Federal Research Institute of Fisheries and oceanography (AtlantNIRO), Kaliningrad, Russia

¹ v_dubravina@mail.ru

² sea@atlantniro.ru

Abstract. The study has been carried out with the use of long-term arrays of X, Y coordinates and the resulting vector M of the position of the North Pole of the Earth's rotation (PNPER) (m) with the resolution of 0.05 years for the period of 1890–2020 [1] and 1 day for the period of 1962–2020 [2]. According to the model [3], consisting of day-to-day (synoptic) (SI), irregular intra-annual (IIA), regular seasonal variation (SeasV), and interannual (IA) components, estimates of the contributions of each type of fluctuations to the total temporal variability have been obtained. It is shown that the maximum contributions to the variance of the time series [1, 2] in the interval of 1962–2020 for all parameters introduce IIA (54.3–61.4%); the specific contribution of SeasV is significant (19.1–27.3%); the contribution of IA is noticeable (9.9–24.9%); the minimum contribution falls on SI (1.0–1.7%). In this case, the specific contribution of SI with increasing resolution from one day to 18–19 days decreases by 0.5–0.8%, and the relative error when replacing daily time series with 18–19-day data for the SI contribution is 33.6–43.9 %, and cannot be correctly used to assess the SI contribution. Therefore, the intra-annual variation of the specific contribution and the SI range is considered for all parameters only for the array [2]. At the same time, the maximum in the annual variation of the specific contribution of SI for M occurs in December (3.7 %), and the minimum in June (0.7 %). The intra-annual variability of the SI range for M, Y, and X is characterized by a semi-annual wave with maximums in February–March and September (1.3÷1.4 m) and minimums in June and December (0.1÷0.2 m) for M and Y or with maximums in June (1.5 m) and December (1.4 m) and minimums in March (0.3 m) and September (0.4 m) – for X.

Keywords: time series structure, variability (intra-annual, interannual), parameters of the instantaneous position of the North Pole of the Earth's rotation (coordinates X и Y, the modulus of the resulting vector M), analysis (dispersive, harmonic, correlation)

Acknowledgements: The authors are grateful to A.V. Smirnov for the help in data processing; the work has been carried out within the Government assignment for Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (subject No. FMWE-2021-0012).

For citation: Dubravina V. F., Krasnoborodko O. Yu. Evolution of the Earth rotation pole position. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2022; (67):115–128. (In Russ). DOI: 10.46845/1997-3071-2022-67-115-128.

ВВЕДЕНИЕ

Известно [4–6], что Земля, наряду с вращением вокруг своей оси с периодом около 24,00 ч и движением вокруг Солнца с периодом 365,26 сут, совершает целый ряд "неправильных" (прецессии¹ и нутации²) движений, при которых сама фигура вращающейся Земли также испытывает покачивания вокруг оси вращения. При этом точки пересечения оси вращения с поверхностью фигуры Земли перемещаются по ее поверхности. По результатам более чем 130-летних наблюдений [1] считается, что размах качаний полюса по приполярной поверхности не превышает двух десятков метров. Однако это значительная величина для современных практических приложений, зависящих от качества координатного обеспечения [8]. Поэтому движение полюсов принимается во внимание в астрометрии, геодезии, гидрометеорологии, навигации, промысловой океанологии [6, 8–10].

Принято считать [4, 6], что движение полюса можно разделить на две составляющие – периодическую и вековую. В первой, с периодами от 4 сут до 18,6 лет [4], МПСВЗ перемещается по ее поверхности вокруг среднего полюса в направлении вращения Земли (с запада на восток), т. е. против часовой стрелки в северном полушарии. Траектория движения полюсов имеет вид то раскручивающейся, то закручивающейся спирали, причем период такой раскрутки-закрутки (цикла) около 6,5 лет [8]. По нашим оценкам [11, табл. 3], главными из периодических движений Северного полюса являются колебания с периодом 1,19; 1,01; 6,67 и 0,55 г. (14,3; 12,1; 80,0 и 6,6 мес.), при этом первое по интенсивности в 2,8 раза превышает второе, в 24 раза – третье и в 56 раз – четвертое.

Наиболее часто [4, 9] наличие годовой гармоник объясняется как сезонными перемещениями воздушных и водных масс по земной поверхности, так и системой Эль-Ниньо – Южное колебание. Однако следует иметь в виду, что в [4] СезХ угловой скорости вращения Земли (УСВЗ) тоже увязывается с сезонными перемещениями воздушных и водных масс по земной поверхности, при этом с января по апрель вращение Земли замедляется, с апреля по август – ускоряется, с августа по ноябрь – вновь замедляется и с ноября по январь – снова ускоряется. Таким образом, сезонные перемещения воздушных и водных масс по подстилающей поверхности Земли, с одной стороны, в качестве причины существования годовой гармоник движения МПСВЗ с неустойчивым СезХ (с меняющимися от года к году экстремумами), а с другой – с наличием устойчивого неправильного полугодового СезХ УСВЗ, вызывают сомнение [11]. Тем не менее в работе [5] подчеркивается, что не только 14-месячная, но и годичная компоненты колебаний имеют небесно-механическую природу и обусловлены гравитационно-приливным воздействием Солнца и Луны. Это подтверждается в [11, табл. 8] результатами расчета кросс-

¹ Прецессия – медленное периодическое движение оси вращающейся Земли, описывающей конус. Прецессия происходит из-за того, что ось вращения Земли не перпендикулярна эклиптике, а наклонена к ней примерно на $23,5^\circ$ и поэтому подвержена гравитационным возмущениям со стороны тел Солнечной системы. Луна и Солнце действуют на ближайшую к ним часть экваториальной выпуклости сильнее, чем на более удаленную, а это создает вращающий момент, который поворачивает ось вращения Земли. Период прецессии составляет около 26 тыс. лет [7].

² Нутация – небольшие колебания в прецессионном движении оси вращения Земли, вызываемые в основном влиянием Луны. Главный период нутации – 18,6 года [7].

спектра между вынуждающими геокосмическими силами и квазициклическостями 14 и 12 мес. параметров МПСВЗ X-1, Y-1, M-1 [1] и X-4, Y-4, M-4 [2].

Что касается вековой составляющей, то, как показывают наблюдения, Северный полюс Земли за 20-е столетие смещался по сложной кривой в направлении меридианов 79–75° з.д. [8, 10], а по оценкам в [12] за последние 125 лет он смещался к 71–72° з.д. с удалением от географического полюса на 11,6–12,0 м.

Ранее нами в [11, 12] были рассмотрены сезонная и межгодовая изменчивости МПСВЗ. Целью настоящей работы является получение количественных оценок вкладов каждого вида колебаний в суммарную временную изменчивость параметров МПСВЗ, состоящую из СИ, ВГИ, СезХ и МГИ компонентов, массивов данных наблюдений ЕОРС01 и ЕОРС04 Международной службы вращения Земли (The International Earth Rotation and Reference Systems Service – IERS) [1, 2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено на материалах многолетних массивов IERS с дискретностью 0,05 г. или 18–19 сут за период 1890–2020 гг. [1] и дискретностью 1 сут за период 1962–2020 гг. [2]³. Координаты МПСВЗ – X и Y в угловых секундах, составляющие на Гринвичский и 90-й западный меридианы, соответственно – были преобразованы в метрическую систему координат с началом в районе Северного географического полюса [10], затем рассчитаны модуль M и направление α результирующего вектора между географическим и мгновенным полюсами. С физической точки зрения M характеризует удаленность мгновенного полюса от географического [11, рис. 2].

Модель временного ряда в настоящей работе соответствует ранее использованной в [3]. При этом исходный ряд (ИР) суммируется из короткопериодной (КП), состоящей только из компоненты СИ, и долгопериодной (ДП) изменчивости, складывающейся из ВГИ, СезХ и МГИ:

$$\text{ИР} = \text{КП} + \text{ДП}, \quad (1)$$

$$\text{ИР} = \text{СИ} + \text{ВГИ} + \text{СезХ} + \text{МГИ}. \quad (2)$$

При расчете внутригодовой изменчивости удельного вклада СИ использовалась дисперсия за весь период наблюдений. Для получения межгодовой изменчивости удельного вклада СИ расчет дисперсии выполнялся с нарастанием, а также пошагово:

$$\Delta\sigma^2_{\text{СИ}i+1}(\%) = 100 * (\sigma^2_{\text{СИ}i+1} - \sigma^2_{\text{СИ}i}) / \sigma^2_{\text{ИР}i+1}. \quad (3)$$

Однако следует напомнить, что существует и модель временного ряда С. К. Гулева [14], в которой КП представлена двумя диапазонами СИ: "быстрые" синоптические процессы, определяемые в основном быстрой сменой барических образований и их отдельных фаз (от 3 ч до 3 сут), и "медленные", связанные преимущественно с океаном и свойствами атмосферных образований (от 3 до 60 сут).

Таким образом, суточная периодичность в модели С. К. Гулева [14], как и в [15], относится к СИ, а в [16], как и в нашей модели (выражения (1) и (2)),

³ В [11] для каждого параметра МПСВЗ, используя методики гармонического, корреляционного, спектрального и статистического анализа [13], получены гармоники их СезХ и выявлена высокая теснота связи – $r \geq 0,89$ между рядами параметров из [1] и [2] за 1962–2020 гг., что позволяет корректно использовать ряды IERS на всем интервале 1890–2020 гг. не только для анализа межгодовой, но и сезонной изменчивости.

$T = 1$ сут – граница между мезомасштабной и синоптической компонентами. Именно поэтому в нашем случае диапазон СИ составляет от 1 до 60 сут.

Исходные ряды обрабатывались с использованием методов дисперсионного, гармонического и корреляционного анализа [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В [12, рис. 2] представлены временные диаграммы модуля радиус-вектора МПСВЗ М-1 за 1890–2020 гг. [1] и М-4 за 1962–2020 гг. [2], наглядно показывающие изменчивость временного хода модуля. Так, для М-1: на интервале 1890–1924 гг. отмечается очень слабый рост ($Tr_{M-1} = 0,016$ м/год), сменяющийся сильным на интервале 1925–1961 гг. ($Tr_{M-1} = 0,170$ м/год), затем с 1962 по 1999 г. положительный тренд ослабевает до $Tr_{1-M} = 0,130$ м/год, а с 2000 по 2020 г. – до $Tr_{1-M} = 0,034$ м/год. Для М-4 на интервале 1962–2020 гг. тенденция схожа: рост на интервале 1962–1999 гг. $Tr_{M-4} = 0,129$ м/год, а на интервале 2000–2020 гг. – ослабление до $Tr_{M-4} = 0,046$ м/год. При этом меняется структура ряда (табл. 1).

Структура временных рядов. Данные наблюдений за параметрами МПСВЗ с дискретностью 1 сут [2] позволяют использовать компоненты модели временного ряда ИР (выражение (2)) (см. табл. 1). Анализ этой таблицы показал, что удельные или относительные вклады, т. е. нормированные на общую дисперсию, компоненты ДП параметров вращения, как для отрезков (1962–1999 и 2000–2020 гг.), так и всего интервала (1962–2020 гг.), являются преобладающими, вклад ДП в дисперсию ИР составляет 98 %, в то время как доля СИ – 2 %. При этом максимальный вклад в дисперсию ИР приходится на ВГИ (для М-4 уменьшение с 61,3 % на первом отрезке до 46,4 % на втором при 54,3 % для всего интервала; для координат X-4 – 72,2; 41,9; 61,4 % и Y-4 – 66,5; 47,9; 57,7 % соответственно). Вклад СезХ значителен (для М-4 рост с 13,9 % на первом отрезке до 45,1 % на втором при 19,1 % для всего интервала; для координат X-4 – 22,1; 49,1; 27,0 % и Y-4 – 16,7; 46,7; 20,8 % соответственно). Вклад МГИ заметен (для М-4 уменьшение с 23,0 % на первом отрезке до 6,3 % на втором при 24,9 % для всего интервала; для координат X-4 – 4,0; 7,2; 9,9 % и Y-4 – 15,2; 3,3; 20,0 % соответственно).

Расчеты показали, что использование данных [2] с месячным осреднением не приведет к большой погрешности в оценках вклада компонент ДП, поскольку различия в удельном вкладе этих компонент между расчетами по ежесуточным и ежемесячным данным наблюдениям не превышают 1,3 %. Так, вклад ВГИ для всех параметров увеличивается на 0,8–1,3 %; СезХ – на 0,2–1,0 % и МГИ – на 0,0–0,5 %. Стало быть, относительная погрешность при замене ежесуточных данных на ежемесячные для вклада ВГИ составляет 1,6–2,1 %; для СезХ и МГИ – 1,5–2,2 %. Таким образом, использование данных МПСВЗ (м) за 1962–2020 гг. только с месячным осреднением не приведет к значительным ошибкам в оценках вкладов компонент ВГИ, СезХ и МГИ в ИР.

Данные наблюдений за параметрами МПСВЗ (1890–2020) с дискретностью 18–19 сут из [1] позволяют корректно использовать компоненты модели временного ряда ДП, поскольку анализ табл. 1 показал, что удельные вклады компонент ДП параметров МПСВЗ как для отрезков (1890–1924, 1925–1961,

1961–1999 и 2000–2020 гг.), так и всего интервала (1890–2020 гг.) являются преобладающими. Так, вклад ДП в дисперсию ИР составляет 99 % для всего интервала и на отрезках, за исключением 1890–1924 и 2000–2020 гг., где вклад ДП снижается до 98 %, в то время как на долю СИ приходится 1 % на всем интервале и отрезках (исключение на интервалах 1890–1924 и 2000–2020 гг., в которых вклад СИ возрастает до 2 %). Для всего интервала максимальный вклад в дисперсию ИР приходится на ВГИ (для М-1 и координат X-1 и Y-1 – 45,0; 62,4 и 40,7 % соответственно); вклад МГИ значителен (45,1; 11,0 и 48,9 %); вклад СезХ заметен (8,8; 25,7 и 9,8 %).

Таблица 1. Дисперсия (верхняя строка) и относительная доля (нижняя строка) составляющих временной изменчивости параметров МПСВЗ (м) за 1890–2020 гг. (дискретность 18–19 сут и 1 мес.) и 1962–2020 гг. (дискретность 1 сут и 1 мес.), рассчитанная по данным [1, 2]

Table 1. Dispersion (top row) and relative proportion (bottom row) of the components of the temporal variability of the PNPV parameters (m) for 1890–2020 (resolution 18–19 days and 1 month) and for 1962–2020, (resolution 1 day and 1 month), calculated from the data [1, 2]

Дисперсия					Дисперсия				
Общая	КП	ДП			Общая	КП	ДП		
ИР	СИ	СезХ	ВГИ	МГИ	ИР	СИ	СезХ	ВГИ	МГИ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
МПСВЗ-М-1 (1890-2020)					-				
16,42	0,18	1,44	7,40	7,41	-	-	-	-	-
100,0	1,1	8,8	45,0	45,1	-	-	-	-	-
16,24	-	1,44	7,40	7,41	-	-	-	-	-
100,0	-	8,9	45,5	45,6	-	-	-	-	-
МПСВЗ-X-1 (1890-2020)					-				
18,43	0,16	4,74	11,50	2,03	-	-	-	-	-
100,0	0,9	25,7	62,4	11,0	-	-	-	-	-
18,27	-	4,74	11,50	2,03	-	-	-	-	-
100,0	-	25,9	63,0	11,1	-	-	-	-	-
МПСВЗ-Y-1 (1890-2020)					-				
28,76	0,17	2,83	11,71	14,05	-	-	-	-	-
100,0	0,6	9,8	40,7	48,9	-	-	-	-	-
28,59	-	2,83	11,71	14,05	-	-	-	-	-
100,0	-	9,9	41,0	49,1	-	-	-	-	-
МПСВЗ-М-1 (1890-1961)					-				
13,55	0,19	0,67	6,35	6,35	-	-	-	-	-
100,0	1,4	4,9	46,9	46,8	-	-	-	-	-
13,37	-	0,67	6,35	6,35	-	-	-	-	-
100,0	-	5,0	47,5	47,5	-	-	-	-	-
МПСВЗ-X-1 (1890-1961)					-				
19,48	0,18	5,09	12,93	1,28	-	-	-	-	-
100,0	0,9	26,1	66,4	6,6	-	-	-	-	-
19,30	-	5,09	12,93	1,28	-	-	-	-	-
100,0	-	26,3	67,0	6,7	-	-	-	-	-
МПСВЗ-Y-1 (1890-1961)					-				
27,43	0,18	2,39	13,45	11,42	-	-	-	-	-
100,0	0,7	8,7	49,0	41,6	-	-	-	-	-
27,25	-	2,39	13,45	11,42	-	-	-	-	-
100,0	-	8,8	49,3	41,9	-	-	-	-	-

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
МПСПВЗ-М-1 (1962-1999)					МПСПВЗ-М-4 (1962-1999)				
16,52	0,14	2,32	10,49	3,58	16,52	0,29	2,29	10,13	3,81
100,0	0,8	14,0	63,5	21,7	100,0	1,8	13,9	61,3	23,0
16,38	-	2,32	10,49	3,58	16,23	-	2,29	10,13	3,81
100,0	-	14,2	64,0	21,8	100,0	-	14,1	62,4	23,5
МПСПВЗ-Х-1 (1962-1999)					МПСПВЗ-Х-4 (1962-1999)				
17,55	0,24	3,93	12,65	0,72	17,56	0,30	3,89	12,67	0,70
100,0	1,4	22,4	72,1	4,1	100,0	1,7	22,1	72,2	4,0
17,31	-	3,93	12,65	0,72	17,25	-	3,89	12,67	0,70
100,0	-	22,7	73,1	4,2	100,0	-	22,5	73,5	4,0
МПСПВЗ-У-1 (1962-1999)					МПСПВЗ-У-4 (1962-1999)				
18,46	0,18	3,07	12,41	2,80	18,44	0,30	3,07	12,26	2,81
100,0	1,0	16,6	67,2	15,2	100,0	1,6	16,7	66,5	15,2
18,28	-	3,07	12,41	2,80	18,14	-	3,07	12,26	2,81
100,0	-	16,8	67,9	15,3	100,0	-	16,9	67,6	15,5
МПСПВЗ-М-1 (2000-2020)					МПСПВЗ-М-4 (2000-2020)				
8,60	0,20	3,86	4,02	0,52	8,60	0,19	3,88	3,98	0,55
100,0	2,3	44,9	46,8	6,0	100,0	2,2	45,1	46,4	6,3
8,40	-	3,86	4,02	0,52	8,41	-	3,88	3,98	0,55
100,0	-	46,0	47,8	6,2	100,0	-	46,1	47,4	6,5
МПСПВЗ-Х-1 (2000-2020)					МПСПВЗ-Х-4 (2000-2020)				
10,47	0,18	5,15	4,34	0,80	10,47	0,19	5,14	4,39	0,76
100,0	1,7	49,2	41,4	7,7	100,0	1,8	49,1	41,9	7,2
10,29	-	5,15	4,34	0,80	10,28	-	5,14	4,39	0,76
100,0	-	50,1	42,1	7,8	100,0	-	49,9	42,7	7,4
МПСПВЗ-У-1 (2000-2020)					МПСПВЗ-У-4 (2000-2020)				
8,87	0,13	4,18	4,25	0,31	8,87	0,19	4,14	4,25	0,29
100,0	1,5	47,1	48,0	3,4	100,0	2,1	46,7	47,9	3,3
8,74	-	4,18	4,25	0,31	8,68	-	4,14	4,25	0,29
100,0	-	47,8	48,7	3,5	100,0	-	47,7	49,0	3,3
МПСПВЗ-М-1 (1962-2020)					МПСПВЗ-М-4 (1962-2020)				
14,69	0,14	2,82	8,24	3,50	14,71	0,26	2,81	7,99	3,65
100,0	1,0	19,2	56,0	23,8	100,0	1,7	19,1	54,3	24,9
14,55	-	2,82	8,24	3,50	14,45	-	2,81	7,99	3,65
100,0	-	19,4	56,6	24,0	100,0	-	19,4	55,3	25,3
МПСПВЗ-Х-1 (1962-2020)					МПСПВЗ-Х-4 (1962-2020)				
15,88	0,17	4,34	9,72	1,66	15,89	0,26	4,29	9,76	1,57
100,0	1,1	27,3	61,2	10,4	100,0	1,7	27,0	61,4	9,9
15,72	-	4,34	9,72	1,66	15,63	-	4,29	9,76	1,57
100,0	-	27,6	61,9	10,5	100,0	-	27,4	62,5	10,1
МПСПВЗ-У-1 (1962-2020)					МПСПВЗ-У-4 (1962-2020)				
16,39	0,16	3,43	9,54	3,26	16,39	0,25	3,41	9,45	3,27
100,0	1,0	20,9	58,2	19,9	100,0	1,5	20,8	57,7	20,0
16,23	-	3,43	9,54	3,26	16,14	-	3,41	9,45	3,27
100,0	-	21,1	58,8	20,1	100,0	-	21,2	58,6	20,3

Расчеты показали, что использование этих данных с месячным осреднением не приведет к большой погрешности в оценках вклада составляющих ДП, поскольку различия в удельном вкладе этих компонент между расчетами по 18–19-суточным и ежемесячным данным наблюдения не превышают 1,1 %. Так, вклад ВГИ для всех параметров увеличивается на 0,3–1,0 %, СезХ – на 0,1–1,1 % и

МГИ – на 0,1–1,0 %. Стало быть, относительная погрешность при замене данных с дискретностью 18–19 сут на ежемесячные для вклада ВГИ составляет 0,6–2,1 %, для СезХ – 0,6–2,4 % и для МГИ – 0,5–2,4 %. Таким образом, использование данных МПСВЗ (м) за 1890–2020 гг. только с месячным осреднением не приведет к значительным ошибкам в оценках вкладов компонент ВГИ, СезХ и МГИ в ИР.

Проведем сравнение результатов анализа временных рядов МПСВЗ с суточной и 18–19-суточной дискретностью по выражению (2) на общем интервале 1962–2020 гг. (см. табл. 1). Так, удельный вклад СИ при увеличении дискретности от суток до 18–19 сут в основном уменьшается на 0,1–1,0 %, за исключением М-1 на отрезке 2000–2020 гг., когда вклад СИ увеличился на 0,1 %. Стало быть, относительная погрешность при замене ежесуточных данных на 18–19-суточные для вклада СИ на отдельных временных отрезках составляет $(-5,8) \div 53,5$ %. Таким образом, ряд с 18–19-суточной дискретностью не может быть корректно использован для оценки вклада СИ. Удельный вклад СезХ при увеличении дискретности от суток до 18–19 сут в основном увеличивается на 0,1–0,4 %, за исключением М-1 на отрезке 2000–2020 гг., когда вклад СезХ уменьшился на 0,2 %. Вклад ВГИ для М-1 и Y-1 увеличивается на 0,1–2,2 %, а для X-1 уменьшается на 0,1–0,5 %. Вклад МГИ для X-1 увеличивается на 0,1–0,5 %, а для М-1 и Y-1 в основном уменьшается на 0,1–1,3 %. Относительная погрешность при замене ежесуточных данных на 18–19-суточные для вклада СезХ составляет 0,2–1,3 %, для ВГИ – 0,1–3,6 % и для МГИ – 0,2–6,5 %. Таким образом, использование данных МПСВЗ (м) за 1890–2020 гг. только с 18–19-суточной дискретностью не приведет к значительным ошибкам в оценках вкладов компонент ВГИ, СезХ и МГИ в ИР.

Внутригодовая изменчивость вклада и размаха СИ. Выше было показано, что при замене ежесуточных данных на 18–19-суточные относительная погрешность для вклада СИ на отдельных временных отрезках составляет $(-5,8) \div 53,5$ %. Поэтому внутригодовая изменчивости СИ будет исследована только по данным с суточной дискретностью (табл. 2). Можно говорить о подобии внутригодовой изменчивости удельного вклада СИ только для М-4 или координат X-4 или Y-4 на временных отрезках (теснота связи между ними высока – $r = 0,86 \div 0,99$). О подобии вклада внутригодовой изменчивости СИ между М-4 и Y-4 говорить не приходится – теснота связи мала ($r = (-0,11) \div 0,18$), а между М-4 и X-4 теснота связи вклада внутригодовой изменчивости СИ становится отрицательной ($r = (-0,62) \div (-0,18)$), как и между координатами Y-4 и X-4 ($r = (-0,71) \div (-0,53)$).

Внутригодовая изменчивость удельного вклада СИ для М-4 на всех интервалах составляет максимум в ноябре–декабре ($3,6 \div 5,5$ %) и минимум в июне ($0,7 \div 1,4$ %). Для координат Y-4 и X-4 внутригодовая изменчивость удельного вклада СИ характеризуется полугодовой волной с максимумами в марте ($2,4 \div 4,9$ %), августе–сентябре ($2,3 \div 4,3$ %) и минимумами в июне ($1,3 \div 2,5$ %), ноябре–декабре ($1,4 \div 2,7$ %) для Y-4, а также с максимумами в июне ($3,0 \div 5,9$ %), декабре ($2,5 \div 3,8$ %) и минимумами в феврале ($1,7 \div 2,2$ %), сентябре ($1,7 \div 2,5$ %) для X-4.

Перейдем к внутригодовой изменчивости размаха СИ. Последняя характеризуется большим подобием, чем внутригодовая изменчивость удельного вклада. Так, только для М-4, или координаты Y-4, на временных отрезках теснота связи высока – $r = 0,94 \div 0,99$, для X-4 между временными отрезками теснота связи не-

сколько ниже – $r = 0,75 \div 0,95$). Теснота связи внутригодовой изменчивости размаха СИ между М-4 и координатой Y-4 также высока ($r = 0,82 \div 0,96$), а между М-4 и X-4, или координатами Y-4 и X-4, теснота связи становится отрицательной ($r = (-0,87) \div (-0,61)$) и ($r = (-0,94) \div (-0,74)$) соответственно.

Внутригодовая изменчивость размаха СИ для М-4 и координат Y-4 и X-4 на всех интервалах характеризуется полугодовой волной с максимумами в феврале–марте ($1,3 \div 1,4$ м), сентябре ($1,3 \div 1,5$ %) и минимумами в июне ($0,1 \div 0,4$ м), декабре ($0,1 \div 0,3$ м) для М-4 и Y-4 или с максимумами в июне ($1,5 \div 1,7$ м), декабре ($1,3 \div 1,6$ м) и минимумами в феврале ($0,2 \div 0,4$ м), августе–сентябре ($0,3 \div 0,5$ м) для X-4, т. е. в противофазе относительно М-4 и Y-4. (табл. 2).

Таблица 2. Внутригодовая изменчивость удельного вклада (%) (верхняя строка) и размаха (нижняя) синоптической составляющей параметров МПСВЗ (м) за 1962–2020 гг., (дискретность 1 сут), рассчитанная по данным [2]

Table 2. Intra-annual variability of the specific contribution (%) (top line) and the range (lower) of the synoptic component of the PNPV parameters (m) for 1962-2020, (resolution 1 day), calculated from the data [2]

Месяцы											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
МПСВЗ-М-4 (1962-1999)											
3,15	2,04	1,96	1,44	0,83	<i>0,69</i>	0,95	1,51	2,02	2,66	3,01	<i>3,65</i>
0,74	<i>1,36</i>	1,09	0,86	0,40	<i>0,05</i>	0,36	0,89	<i>1,20</i>	1,01	0,54	<i>0,09</i>
МПСВЗ-X-4 (1962-1999)											
2,34	<i>1,70</i>	1,85	2,12	2,64	<i>2,99</i>	2,90	1,92	<i>1,78</i>	2,50	2,43	<i>2,49</i>
1,17	1,37	0,20	0,75	1,23	<i>1,46</i>	1,30	0,55	0,28	0,93	1,24	<i>1,29</i>
МПСВЗ-Y-4 (1962-1999)											
1,83	1,61	<i>2,45</i>	2,13	1,51	<i>1,42</i>	1,83	<i>2,29</i>	2,24	1,91	<i>1,38</i>	1,52
0,74	1,26	1,33	1,09	0,49	<i>0,11</i>	0,67	1,18	1,31	1,02	0,41	<i>0,16</i>
МПСВЗ-М-4 (2000-2020)											
3,90	3,44	4,34	3,87	2,45	<i>1,44</i>	1,87	2,85	4,07	5,03	<i>5,52</i>	4,99
0,77	1,19	<i>1,41</i>	1,16	0,64	<i>0,08</i>	0,55	1,04	<i>1,47</i>	1,39	0,78	<i>0,12</i>
МПСВЗ-X-4 (2000-2020)											
3,73	2,20	2,72	3,39	4,94	<i>5,85</i>	5,00	3,29	<i>2,47</i>	3,62	3,56	<i>3,79</i>
1,13	0,52	0,42	0,95	1,49	<i>1,67</i>	1,27	0,51	0,53	1,23	1,46	<i>1,55</i>
МПСВЗ-Y-4 (2000-2020)											
3,21	3,49	<i>4,85</i>	4,18	2,89	2,53	3,42	4,03	<i>4,35</i>	3,78	2,74	2,73
0,94	1,24	1,43	1,14	0,45	<i>0,37</i>	1,05	1,40	1,44	1,04	0,34	<i>0,32</i>
МПСВЗ- М-4 (1962-2020)											
3,10	2,08	2,18	1,62	0,90	<i>0,68</i>	0,94	1,55	2,18	2,87	3,19	<i>3,67</i>
0,75	<i>1,25</i>	1,21	0,97	0,49	<i>0,06</i>	0,43	0,94	<i>1,30</i>	1,15	0,63	<i>0,07</i>
МПСВЗ-X-4 (1962-2020)											
2,51	<i>1,71</i>	1,86	2,16	2,77	<i>3,12</i>	2,85	1,86	<i>1,69</i>	2,52	2,53	<i>2,66</i>
1,16	0,97	0,26	0,83	1,33	<i>1,53</i>	1,29	0,53	0,36	1,04	1,32	<i>1,38</i>
МПСВЗ-Y-4 (1962-2020)											
1,81	1,60	<i>2,44</i>	2,06	1,42	<i>1,35</i>	1,86	2,38	<i>2,40</i>	2,03	<i>1,44</i>	1,53
0,81	1,24	1,36	1,10	0,48	<i>0,19</i>	0,80	1,26	1,35	1,03	0,39	<i>0,21</i>

Примечание. Максимальные величины даны курсивом и подчеркнуты снизу, минимальные – курсивом.

Межгодовая изменчивость составляющих ИР. Ранее нами при анализе длинных рядов гидрометеозлементов в регионах Балтики показано, что возрастание доли основной составляющей с увеличением длины ряда справедливо только для первых 6–10 лет, дальнейшее увеличение длины ряда приводит к затуханию

колебаний относительно среднего значения и для основной составляющей, и для всех остальных компонентов гидрометеорологических элементов [3, с 318]. В [17] при анализе температуры воздуха T_a (°C) в Варнемюнде, Калининграде и Стокгольме было показано, что для всех станций стабилизация относительной доли дисперсии с нарастанием всех компонент наступает через ~30–40 лет (в Стокгольме к 1790 г., в Калининграде к 1880 г. и в Варнемюнде к 1972 г.). Наши расчеты (рис. 1, 2) подтверждает этот вывод.

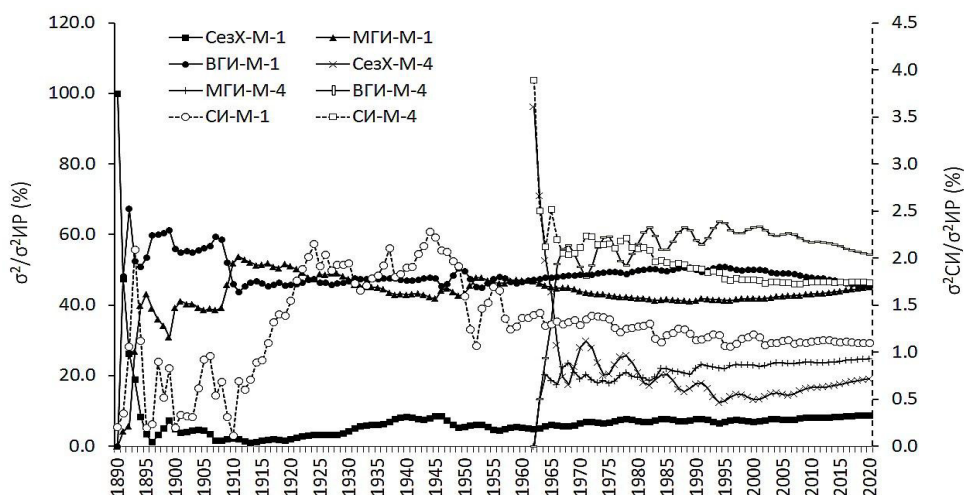


Рис. 1. Относительная доля дисперсии (с нарастанием) составляющих временной изменчивости МПСВЗ М-1 за 1890–2020 гг. (18–19-суточная дискретность) и М-4 за 1962–2020 гг. (суточная дискретность), рассчитано по [1, 2]

Fig. 1. The relative proportion of the components variance (with increasing) of the temporal variability of the M-1 PNPV for 1890–2020 (18–19-day resolution) and M-4 for 1962–2020 (daily resolution), calculated according with [1, 2]

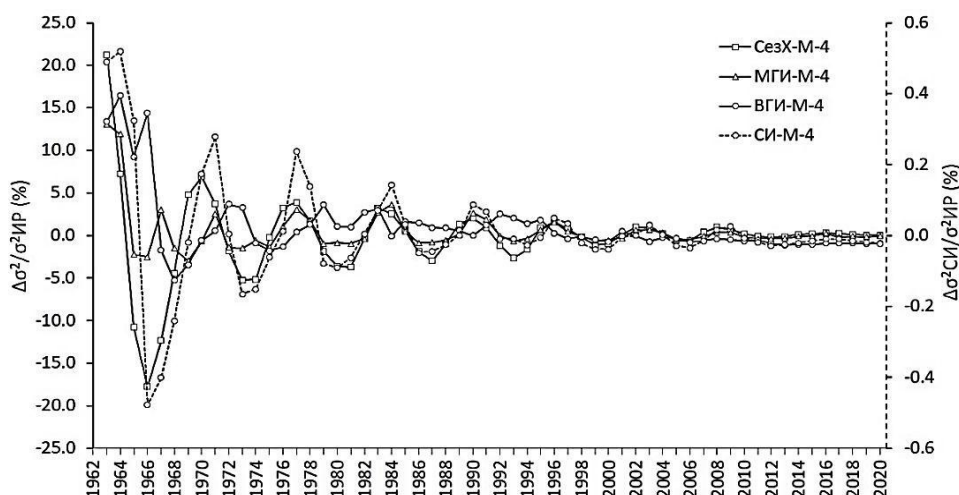


Рис. 2. Пошаговые разности относительной доли (с нарастанием) составляющих временной изменчивости МПСВЗ М-4 за 1962–2020 гг. (дискретность 1 сут), рассчитано по данным [2]

Fig. 2. Step-by-step differences in the relative part (with increasing) of the components of the temporal variability of the M-4 PNPV for 1962–2020 (resolution 1 day), calculated according with [2]

С 1900–1902 гг. начинается стабилизация удельного вклада компонент для параметров М-1, Y-1 и X-1 из [1] и с 1971–1973 гг. – для параметров М-4, Y-4 и X-4 из [2], наступает стабилизация удельного вклада всех компонент в дисперсию ИР для всех параметров МПСВЗ из [1 и 2] через 30–35 лет, т. е. с 1920–1925 гг. для параметров из [1] и с 1992–1997 гг. – из [2] (см. рис. 1). Более наглядно это видно на рис. 2, где представлены пошаговые разности всех компонент с нарастанием временной изменчивости результирующего модуля М-4 из [2], нормированных на общую дисперсию. Так, пошаговые разности на интервале 1971–1973 гг. снижаются до $0,56 \div 3,29$ % (что составляет 1,2–5,8 % от удельного вклада на этом интервале); до $3,70 \div (-5,21)$ % (или 12,4–22,0 %); до $2,60 \div (-1,50)$ % (или 12,8–8,3 %) и до $0,28 \div (-0,16)$ % (или 12,4–7,7 % от вклада на указанном интервале) для составляющих ВГИ, СезХ, МГИ и СИ соответственно.

На интервале 1992–1997 гг. пошаговые разности снижаются до $2,53 \div (-0,37)$ % (что составляет 4,3–0,6 % от удельного вклада на этом интервале); до $(-1,20) \div 0,82$ % (или 7,3–5,6 %); до $(-0,04) \div 0,49$ % (или 0,2–2,1 %) и до $(-0,01) \div 0,03$ % (или 0,5–1,9 % от вклада на указанном интервале) для составляющих ВГИ, СезХ, МГИ и СИ соответственно.

ВЫВОДЫ

1. Максимальные вклады в дисперсию исходных рядов [1, 2] на интервале 1962–2020 гг. для всех параметров вносит ВГИ (54,3–61,4 %), удельный вклад СезХ значителен (19,1–27,3 %), вклад МГИ заметен (9,9–24,9 %), минимальный вклад приходится на СИ (1,0–1,7 %).

2. Удельный вклад СИ при увеличении дискретности от суток до 18–19 сут уменьшается на 0,5–0,8 %, а относительная погрешность при замене ежесуточных данных на 18–19-суточные для вклада СИ на интервале 1962–2020 гг. составляет 33,6–43,9 % (на отдельных временных отрезках $(-5,8) \div 53,5$ %), т. е. удельный вклад не может быть корректно использован для оценки вклада СИ. Поэтому рассмотрен внутригодовой ход удельного вклада и размаха СИ для всех параметров только для массива [2].

3. Максимум в годовом ходе удельного вклада СИ для М-4 наступает в декабре (3,7 %), а минимум – в июне (0,7 %). Для Y-4 и X-4 внутригодовая изменчивость вклада СИ характеризуется полугодовой волной с максимумами в марте, сентябре (2,4 %) и минимумами в июне (1,3 %), ноябре (1,4 %) для Y-4 и с максимумами в июне (3,1 %), декабре (2,7 %) и минимумами в феврале, сентябре (1,7 %) для X-4.

4. Внутригодовая изменчивость размаха СИ для М-4, Y-4 и X-4 характеризуется полугодовой волной с максимумами в феврале–марте, сентябре ($1,3 \div 1,4$ м) и минимумами в июне, декабре ($0,1 \div 0,2$ м) для М-4 и Y-4 или с максимумами в июне (1,5 м), декабре (1,4 м) и минимумами в марте (0,3 м), сентябре (0,4 м) для X-4.

5. Нормированные на общую дисперсию компоненты временной изменчивости параметров МПСВЗ СИ, ВГИ, СезХ и МГИ отличаются устойчивостью. С увеличением длины временного ряда каждого из параметров разброс ее компонент относительно среднего все больше уменьшается. При этом с 1900–1902 гг. начинается стабилизация удельного вклада компонент для параметров М-1, Y-1,

X-1 из [1] и с 1971–1973 гг. – для параметров M-4, Y-4 и X-4 из [2], наступает стабилизация удельного вклада всех компонент в дисперсию ИР для всех параметров МПСВЗ из [1, 2] через 30–35 лет, т. е. с 1920–1925 гг. для параметров из [1] и с 1992–1997 гг. – из [2].

Список источников

1. Earth orientation parameters C01: The International Earth Rotation and Reference Systems Service. URL: <https://hpiers.obspm.fr/eoppc/eop/eopc01.htm> (дата обращения: 21.02.2021).
2. Earth orientation parameters C04: The International Earth Rotation and Reference Systems Service. URL: <https://hpiers.obspm.fr/eoppc/eop/eopc04.htm> (дата обращения: 21.02.2021).
3. Дубравин В. Ф. Эволюции гидрометеорологических полей в Балтийском море: монография. Калининград: Капрос, 2014. 438 с.
4. Сидоренков Н. С. Физика нестабильностей вращения Земли: монография. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 380 с.
5. Перепелкин В. В. Математическое моделирование колебаний полюса возмущенных движений Земли относительно центра масс: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. Москва, 2007. 17 с.
6. Медведев И. П., Рабинович А. Б., Куликов Е. А. Чандлеровские биения, полюсный прилив и колебания уровня океана // Природа. 2021. № 7. С. 3–14.
7. Старков В. Н. Экология ближнего космоса (терминология): справочное пособие. Санкт-Петербург: Изд.-во СОЛО, 2010. 120 с.
8. Пасынок С. Л. Методы и средства определения параметров вращения Земли // Альманах современной метрологии. 2016. № 3 (8). С. 269–323.
9. Сидоренков Н. С. Межгодовые колебания системы Атмосфера – Океан – Земля // Природа. 1999. № 7. С. 26–34.
10. Краснобородько О. Ю. О повторяемости очень сильных и катастрофических Эль-Ниньо и их влиянии на промысел в Перуанском подрайоне Юго-Восточной Пацифики // Тр. АтлантНИРО. 2018. Т. 2. № 2. С. 66–83.
11. Дубравин В. Ф., Краснобородько О. Ю. Особенности сезонной изменчивости положения мгновенного полюса вращения Земли // IX Междунар. науч. конф. "Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов" (4–9 окт. 2021 г.): материалы. Калининград, Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО "КГТУ". 2021. Т. 3. С. 70–81.
12. Краснобородько О. Ю., Дубравин В. Ф. Особенности межгодовой изменчивости положения мгновенного полюса вращения Земли // IX Междунар. науч. конф. "Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов" (4–9 окт. 2021 г.): материалы. Калининград, Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО "КГТУ". 2021. Т. 3. С. 82–91.
13. Брукс К., Карузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. Ленинград: Гидрометеиздат, 1963. 416 с.
14. Гулев С. К., Колинко А. В., Лаппо С. С. Синоптическое взаимодействие океана и атмосферы в средних широтах: монография. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1994. 320 с.

15. Woods J. D. Do waves limit turbulent diffusion in the ocean? // *Nature*. 1980. V. 288. №. 5788. P. 219–224.
16. Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С. Синоптические вихри в океане: монография. Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. 264 с.
17. Дубравин В. Ф., Стонт Ж. И. Долгопериодная (сезонная и межгодовая) изменчивость температуры воздуха в Балтийском регионе // *Процессы в геосредах*. 2020. № 4 (26). С. 902–909.

References

1. Earth orientation parameters C01: The International Earth Rotation and Reference Systems Service. Available at: <https://hpiers.obspm.fr/eoppc/eop/eopc01.htm> (Accessed 21 February 2021).
2. Earth orientation parameters C04: The International Earth Rotation and Reference Systems Service. Available at: <https://hpiers.obspm.fr/eoppc/eop/eopc04.htm> (Accessed 21 February 2021).
3. Dubravin V. F. *Evolutsii gidrometeorologicheskikh poley v Baltiyskom more* [Evolution of hydrometeorological fields in the Baltic Sea]. Kaliningrad, Capros, 2014, 438 p.
4. Sidorenkov N. S. *Fizika nestabil'nostey vrashcheniya Zemli* [Physics of the Earth's rotation instabilities]. Moscow, Fizmatlit, 2002, 380 p.
5. Perepelkin V. V. *Matematicheskoe modelirovanie kolebaniy polyusa vozmushchennykh dvizheniy Zemli otnositel'no tsentra mass. Avtoreferat diss. kand. fiz.-mat. nauk* [Mathematical modeling of oscillations of the disturbed motion of the Earth's pole relative to the center of mass. Abstract of dis. dr. sci.]. Moscow, 2007, 17 p.
6. Medvedev I. P., Rabinovich A. B., Kulikov E. A. Chandlerovskie bieniya, polyusnyy priliv i kolebaniya urovnya okeana [Chandler wobble, pole tide, and sea level fluctuations in the World Ocean]. *Priroda*, 2021, no. 7, pp. 3–14.
7. Starkov V. N. *Ekologiya blizhnego kosmosa (terminologiya): spravochnoe posobie* [Ecology of near space (terminology): a reference manual]. Saint-Petersburg, Solo, 2010, 120 p.
8. Pasynok S. L. Metody i sredstva opredeleniya parametrov vrashcheniya Zemli [Methods and tools for determining the parameters of the Earth's rotation]. *Al'manakh sovremennoy metrologii*, 2016, no. 3 (8), pp. 269–323.
9. Sidorenkov N. S. Mezhdogovye kolebaniya sistemy Atmosfera – Okean – Zemlya [Interannual Oscillations of the Earth – Ocean – Atmosphere system]. *Priroda*, 1999, no. 7, pp. 26–34.
10. Krasnoborod'ko O. Yu. O povtoryaemosti ochen' sil'nykh i katastroficheskikh El'-Nin'o i ikh vliyaniy na promysel v Peruanskom podrayone Yugo-Vostochnoy Patsifiki [On recurrence of heavy and disastrous El Niño and its impact on fishery in the Peruvian subarea of the South-East Pacific]. *Trudy AtlantNIRO*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 66–83.
11. Dubravin V. F., Krasnoborod'ko O. Yu. Osobennosti sezonnoy izmenchivosti polozheniya mgnovennogo polyusa vrashcheniya Zemli [Features of seasonal variability of the position of the instantaneous pole of the Earth's rotation]. *Materialy 9 Mezhdunar. nauchn. konf. "Vodnye bioresursy, akvakul'tura i ekologiya vodoemov" (4–9 okt. 2021)* [Proc. 9th Int. scient. conf. "Aquatic biological resources, aquaculture and

ecology of basins" (4–9 Oct. 2021)]. Kaliningrad, BGARF FGBOU VO "KGTU" Publ., 2021, vol. 3, pp. 70–81.

12. Krasnoborod'ko O. Yu., Dubravin V. F. Osobennosti mezhgodovoy izmenchivosti polozheniya mgnovennogo polyusa vrashcheniya Zemli [Features of inter-annual variability of the position of the instantaneous pole of the Earth's rotation]. *Materialy 9 Mezhdunar. nauchn. konf. "Vodnye bioresursy, akvakul'tura i ekologiya vodoe-mov"* (4–9 okt. 2021) [Proc. 9th Int. scient. conf. "Aquatic biological resources, aquaculture and ecology of basins" (4–9 Oct. 2021)]. Kaliningrad, BGARF FGBOU VO "KGTU" Publ., 2021, vol. 3, pp. 82–91.

13. Brooks K., Karuzers H. *Primenenie statisticheskikh metodov v meteorologii* [Application of statistical methods in meteorology]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1963, 416 p.

14. Gulev S. K., Kolinko A. V., Lappo S. S. *Sinopticheskoe vzaimodeystvie okeana i atmosfery v srednikh shirotakh* [Synoptic interaction between the ocean and atmosphere at mid-latitudes]. Saint-Petersburg, Gidrometeoizdat, 1994, 320 p.

15. Woods J. D. Do waves limit turbulent diffusion in the ocean? *Nature*, 1980, vol. 288, no. 5788, pp. 219–224.

16. Kamenkovich V. M., Koshlyakov M. N., Monin A. S. *Sinopticheskie vikhri v okeane* [Synoptic eddies in the ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1982, 264 p.

17. Dubravin V. F., Stont Zh. I. Dolgoperiodnaya (sezonnaya i mezhgodovaya) izmenchivost' temperatury vozdukha v Baltiyskom regione [Long-term (seasonal and interannual) air temperature variability in the Baltic region]. *Protsessy v geosredakh*, 2020, no. 4 (26), pp. 902–909.

Информация об авторах

В. Ф. Дубравин – доктор географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник

О. Ю. Краснобородько – заведующий лабораторией промысловой океанологии

Information about the authors

V. F. Dubravin – Doctor of Geography, Associate Professor, Leading Researcher

O.Yu. Krasnoborod'ko – Head of the laboratory of fishery oceanology

Статья поступила в редакцию 05.05.2022; одобрена после рецензирования 15.05.2022; принята к публикации 06.09.2022.

The article was submitted 05.05.2022; approved after reviewing 15.05.2022; accepted for publication 06.09.2022.