

УДК 551.467.3(265.54)

С.И. Кислова¹, **В.В. Плотников**², В.А. Дубина^{2*}

¹ Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт,
690091, г. Владивосток, ул. Фонтанная, 24;

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

ЦИФРОВОЙ ПОРТРЕТ СОСТОЯНИЯ И ИЗМЕНЧИВОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ЯПОНСКОГО МОРЯ

На основании информации о состоянии ледяного покрова Японского моря за период 1960–2019 гг. проведен анализ сезонной и многолетней изменчивости сплоченности и возраста льда в море. Показано, что экстремум изменчивости сплоченности льда приходится на область с 7–8-балльной сплоченностью и следует за перемещением этой области, в первой половине холодного периода (декабрь–май) сезона спускается к югу, а во второй — поднимается обратно к северу. При этом максимальная изменчивость возраста льда связана с областями 1–3-балльного возраста, где вклад термического фактора (процессы таяния или нарастания толщины льда) максимален и имеет наибольший потенциал изменения толщины льда. На основании анализа средних квадратических отклонений и первых трех собственных векторов, полученных по восстановленным полям для центральных декад ледового периода, выделены области синфазной и противофазной изменчивости сплоченности и возраста льда. Приводятся их сравнительные оценки и вклад первых трех эмпирических ортогональных функций в общую изменчивость ледовых условий моря. Анализ спектральных составляющих первых трех эмпирических ортогональных функций полей сплоченности и возраста льда позволил предположить наличие 9–12-, 2–4- и в отдельные периоды 15–16- и 4–6-летних квазипериодических составляющих в многолетней эволюции ледовых условий Японского моря. Кроме того, в распределении спектральных оценок возраста льда часто присутствует период 5–7 лет (1–2-я временная функция декабря, января и апреля).

Ключевые слова: сплоченность, возраст льда, эмпирические ортогональные функции, изменчивость, временные спектры, архив ледовой информации.

DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-978-993.

Kislova S.I., Plotnikov V.V., Dubina V.A. Digital portrait of state and variability for the ice cover of Japan Sea // *Izv. TINRO*. — 2020. — Vol. 200, Iss. 4. — P. 978–993.

* Кислова Светлана Ивановна, научный сотрудник, e-mail: kislovasi@mail.ru; **Плотников Владимир Викторович**, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, e-mail: vlad_plot@poi.dvo.ru; Дубина Вячеслав Анатольевич, кандидат географических наук, заведующий лабораторией, e-mail: dubina@poi.dvo.ru.

Kislova Svetlana I., researcher, Far-Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, 24, Fontannaya St., Vladivostok, 690091, Russia, e-mail: kislova@ferhri.ru; Plotnikov Vladimir V., D. Geogr., professor, principal researcher, Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: vlad_plot@poi.dvo.ru; Dubina Vyacheslav A., Ph.D., head of laboratory, Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: dubina@poi.dvo.ru.

Seasonal and long-term variability of the ice age and concentration in the Japan Sea is analyzed on the base of all available information for 1960–2019. The highest variability of ice concentration is localized in the area with concentration 7–8 points (70–80 %) and follows to shifts of this area: from north to south in early winter and back to the north in late winter. The highest variability of ice age is associated with the area of young ice (age 1–3 points), where influence of melting or freezing on the ice thickness is the greatest. The areas of in-phase and out-phase variability of the ice age and concentration are identified and compared by analysis of standard deviations and 3 the first eigenvectors for restored mid-month fields of ice cover in December–May. Contributions of 3 the first empirical orthogonal functions (EOF) to total variability of the ice cover are determined. Cyclics with periods of 9–12, 2–4, and sometimes 15–16 and 4–6 years are found in variation of EOFs for the ice age and concentration; besides, the 5–7 years periodicity occurs in the ice age spectra for December, January and April.

Key words: ice concentration, ice age, empirical orthogonal functions (EOF), ice cover variability, time spectrum, ice cover.

Введение

Японское море за счет своих транспортных, минеральных, биологических и рекреационных ресурсов имеет громадное значение для экономики Приморского края.

Однако наличие сезонного ледяного покрова вносит коррективы в процессы эффективного развития региона. Ледяной покров затрудняет проведение деятельности на акватории моря. Тем не менее детальное знание ледовой обстановки в каждом районе моря и возможность ее предвидения открывают хорошие перспективы для планирования любых операций на море. Это усиливает насущную необходимость пристального внимания к состоянию и эволюции ледяного покрова.

К настоящему времени в силу разных причин характер и динамика ледяного покрова Японского моря изучены недостаточно.

Анализом ледовых условий Японского моря занимались многие исследователи. Последние, наиболее подробные, описания ледовых условий Японского моря приведены в работах Л.П. Якунина [1979, 2012], В.В. Плотникова с соавторами [Плотников, 2002, 2003; Плотников, Подтележникова, 2002; Четырбоцкий, Плотников, 2005] и И.О. Думанской [2017].

В отмеченных работах, как правило, оценивались эволюция кромки льда, а соответственно характер и динамика ледовитости, а также сведения о различных ледовых фазах. В части описания особенностей полей ледовых характеристик (сплоченность, возраст льда) в море приводились лишь фрагментарные сведения вероятностного характера. При этом, количественный анализ разномасштабных составляющих их изменчивости до сих пор остается открытым вопросом.

Соответственно, целью работы явилось создание цифрового портрета ледяного покрова Японского моря, включающего оценку и анализ пространственно-временной структуры сплоченности и возраста льда.

Материалы и методы

Входными данными послужили:

— база данных «Состояние ледяного покрова Японского моря» [Плотников и др., 2011], содержащая сведения о полях сплоченности и возраста льда с 1960 по 2010 г.;

— карты анализа ледовой обстановки в море для периода 1972–2019 гг. — с сайта http://www.natice.noaa.gov/products/weekly_products.html, с периодичностью 3–4 дня.

Вся информация о состоянии ледяного покрова моря (поля сплоченности и возраста льда) осреднялась по 10-дневным периодам [Плотников, 2002, 2008; Плотников и др., 2011].

Для численной оценки состояния ледяного покрова (распределения сплоченности и возраста льда) площадь моря разбивалась на ряд сравнительно однородных районов — $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ по широте и долготе. Вблизи побережья эти районы имели произвольную форму в зависимости от конфигурации береговой черты (рис. 1).

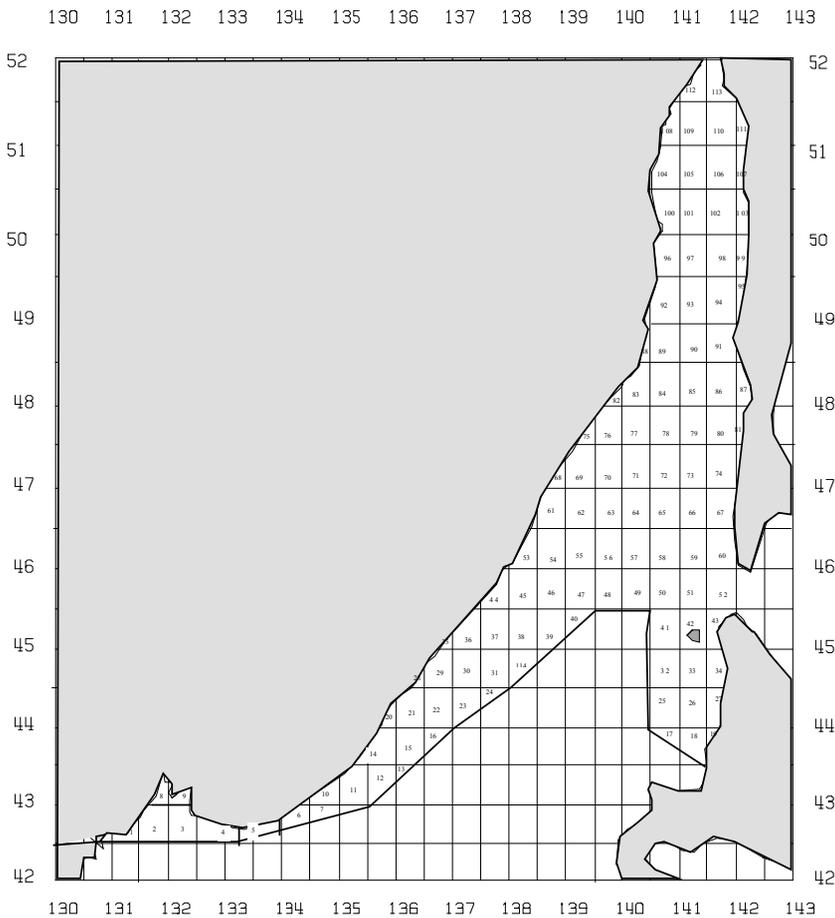


Рис. 1. Расположение и нумерация районов в Японском море для снятия значений ледовых характеристик (непрерывная линия показывает границу предельного распространения льда)

Fig. 1. Location and numbering of the areas in the Japan Sea for ice cover parameters measuring (boundary of the maximum ice spreading is shown by solid line)

Использовались осредненные в рамках этих районов значения сплоченности и возраста льда, отнесенные к центрам соответствующих районов.

В отличие от оценок сплоченности льда, для оценки возраста льда терминология и понятия, используемые в данной работе, несколько отличаются от приведенных в «Международной символикe для морских ледовых карт и номенклатуре морских льдов»*.

Численные значения возраста льда снимались в условных единицах (табл. 1). При этом градации возраста льда соответствуют номенклатуре*. Однако условные единицы (баллы) несколько разнятся. Принятие отличающейся условной (цифровой) шкалы (табл. 1) градаций возраста льда продиктовано тем, что для численного анализа необходимы ранжированные не пересекающиеся числовые ряды, а международная шкала имеет пересекающиеся значения и не ранжирована. Кроме того, учитывалось и качество исходной (спутниковой) информации.

Предполагается, что возможная ошибка представления полей не превышает одного балла [Плотников, 1987, 2008].

В результате для оценки состояния льда была сформирована информационная матрица размерностью $F \cdot M \cdot N \cdot K$, где F — количество параметров ($F = 2$): поля

* Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 56 с.

Таблица 1

Используемые условные обозначения и градации возрастных характеристик льда

Table 1

Used conventions and gradations of ice age

Балл	Возраст (стадия развития льда)	Толщина льда, см
0	Льда нет	—
1	Начальные виды льда	0–5
2	Нилас	5–10
3	Серый лед	10–15
4	Серо-белый	15–30
5	Тонкий однолетний лед	30–70
6	Однолетний лед средней толщины	70–120
7	Толстый однолетний лед	120–180
8	Старый лед (двухлетний, многолетний)	Больше 180

сплоченности и возраста льда; M — количество лет ($M = 60$): с 1960 по 2019 г.; N — количество декад оцениваемого ледового сезона ($N = 18$): с I декады декабря по III декаду мая; K — размерность поля (114 районов).

Однако накопленная после 2010 г. ледовая информация также отличается исходной неполнотой как в пространстве, так и во времени. Таким образом, практически нет ни одного периода с исчерпывающим набором всех элементов, достаточно полно характеризующих состояние ледяного покрова. Сложившаяся ситуация с дефицитом натуральных данных существенно затрудняет создание цифрового портрета и проведение исследований, связанных с анализом ледовых условий и их пространственно-временной изменчивости. Поэтому остро встает вопрос дополнения имеющегося архива данными за последние годы, восстановленными с учетом имеющихся представлений о существующей пространственно-временной структуре ледовых характеристик. Процедура восстановления пропущенных значений подробно описана в ряде публикаций [Плотников, 2002; Плотников, Подтележникова, 2002; и т.д.] и состоит из следующих этапов: расчет эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) по имеющейся системе точек и дальнейшее дополнение пропущенных значений в полях ЭОФ методами оптимизации, основанными на итерационных схемах расчета, интерполяция недостающих временных функций разложения с последующим восстановлением истинных значений поля.

Таким образом, были восстановлены недостающие значения в распределениях сплоченности и возраста льда в Японском море.

Результаты и их обсуждение

Общая характеристика ледового режима Японского моря. Максимальная продолжительность ледового периода в море достигает 80 сут на юге и 170 сут на севере.

Первое появление льда отмечается ближе к середине ноября, после чего наступает фаза активного развития ледяного покрова. Деструкционные (таяние и разрушение) процессы в ледяном покрове обычно развиваются начиная с марта и заканчиваются в мае, приводя к очищению моря.

В период активного развития ледяного покрова Японское море к северу от 49° с.ш. покрывается очень сплоченным льдом. При этом в самой северной части моря обычно локализуется зона серого льда. Южнее ее располагается массив сплоченного серо-белого и тонкого белого льда. Как правило, отмечается широтное распределение возрастных видов льда: от прол. Невельского серый лед постепенно переходит в белый и только вблизи ледовой кромки повторяемость молодого льда вновь увеличивается.

Начиная с марта сплоченность льда быстро уменьшается.

Проведенные расчеты (по формированию полного архива ледовых параметров в Японском море) позволили вплотную подойти к проблеме анализа статистической

структуры ледовых условий и локализации наиболее активных пространственно-временных кластеров.

Сплоченность льда. Результаты расчета средних многолетних распределений сплоченности льда, средних многолетних отклонений и трех первых ЭОФ сплоченности льда для центральных декад каждого месяца ледового сезона представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 2

Распределение вкладов первых трех собственных векторов в суммарную изменчивость полей сплоченности льда Японского моря в различные периоды, %

Table 2

Contributions of 3 the first eigenvectors of total variability of ice concentration in the Japan Sea, by periods, %

Месяц	Номер ЭОФ			Сумма вкладов первых трех ЭОФ
	1	2	3	
Декабрь	45,8	10,6	10,0	66,4
Январь	23,1	16,6	10,1	49,8
Февраль	27,0	15,8	9,2	52,0
Март	23,6	15,7	9,1	48,4
Апрель	43,8	15,1	11,6	70,5
Май	83,7	13,7	2,6	100

При этом более 80 % всей изменчивости полей сплоченности льда заключены в 6-м, 10-, 10-, 10-, 5- и 1-м первых векторах соответственно для декабря, января, февраля, марта, апреля и мая.

Как и следовало ожидать (табл. 2), вследствие сезонной изменчивости наибольший вклад в общую изменчивость приходится на переходные периоды: декабрь — период нарастания льда и апрель-май — период таяния льда. При этом за счет направленного изменения сплоченности льда увеличивается доля изменчивости, приходящаяся на первую ЭОФ. В период относительного стационарирования ледяного покрова (январь-март), когда направленные изменения затухают, вклад первой ЭОФ уменьшается. Вместе с этим уменьшается доля изменчивости, представленной первыми тремя ЭОФ.

Представленные распределения средних многолетних значений (рис. 2) дают более детальное (целостное) представление о распространении и состоянии ледяного покрова в море, чем ранее приведенные кривые вероятности встречи со льдом [Якунин, 1979, 2012], которые отображают лишь общую тенденцию. При этом нулевая изолиния (рис. 2), по понятным причинам, практически совпадает с кривой нулевой вероятности встречи со льдом [Якунин, 1979, 2012]. Помимо этого, цифровой портрет, частным отображением которого является рис. 2, дает детальные сведения об общей изменчивости и ее разномасштабных составляющих в полях сплоченности льда по всем месяцам ледового сезона. Полученные ранее [Плотников, 2002; Плотников и др., 2011] результаты характера изменчивости сплоченности льда отражали лишь осредненную за выделенные ледовые периоды (несколько месяцев) картину. Кроме того, из-за дефицита данных точность расчетов оставляла желать лучшего.

Согласно данным табл. 2, по характеру изменчивости в эволюции ледяного покрова можно выделить три периода: период нарастания льда — декабрь, период относительной стационарности ледяного покрова — с января по март и период уменьшения площади и объема льда — начиная с апреля.

Отмечается (рис. 2), что области с наименьшей изменчивостью ($\sigma \leq 1$) приурочены к акваториям, где сплоченность достигает 9–10 баллов, т.е. формирование ледяного покрова уже произошло (в северных районах и закрытых заливах), или еще только начинается и льда очень мало (меньше 3 баллов) — в юго-восточных районах моря.

Области наибольшей изменчивости расположены на акваториях 7–8-балльной сплоченности, где вклад динамического фактора (дрейф льда, взаимодействие между

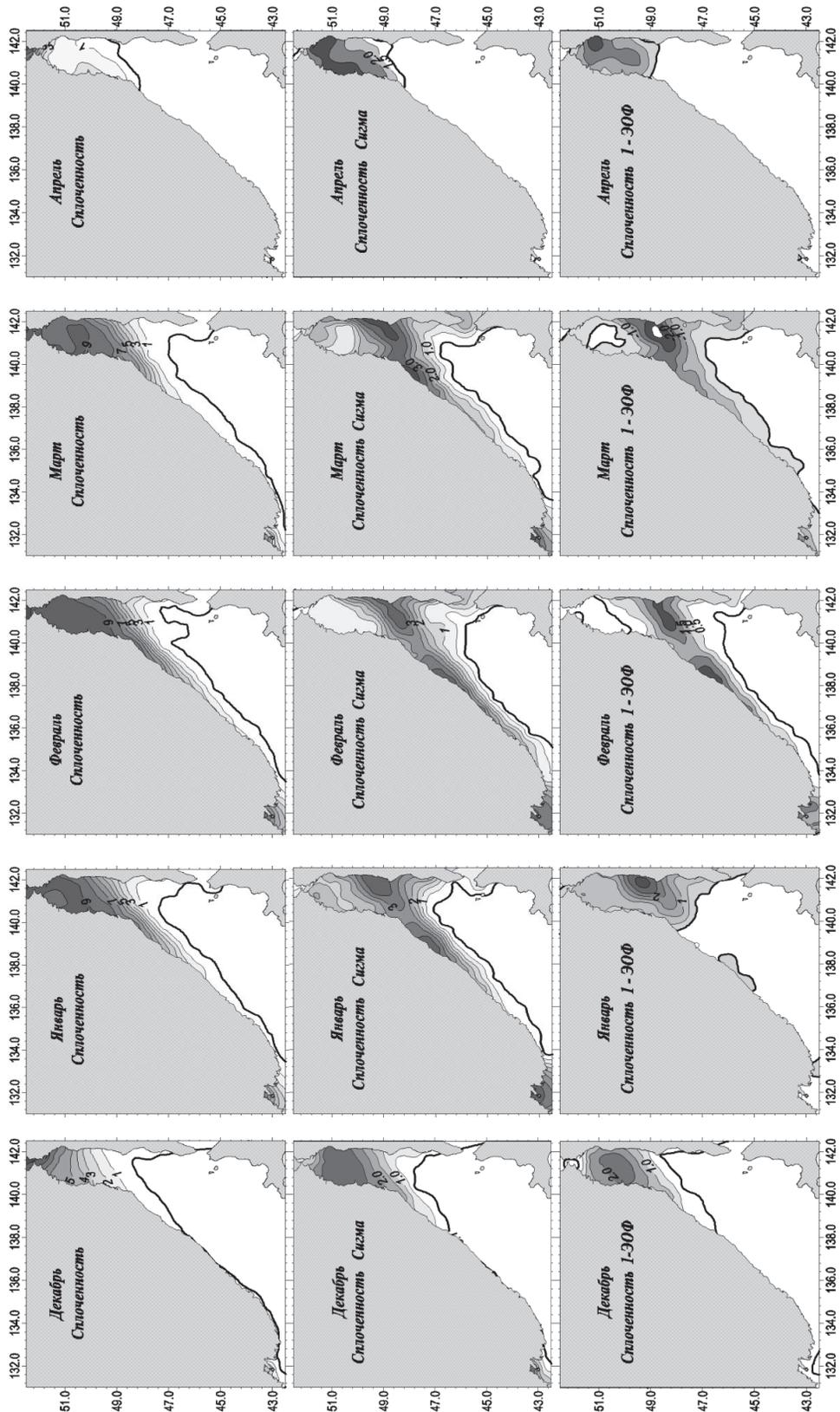


Рис. 2
Fig. 2

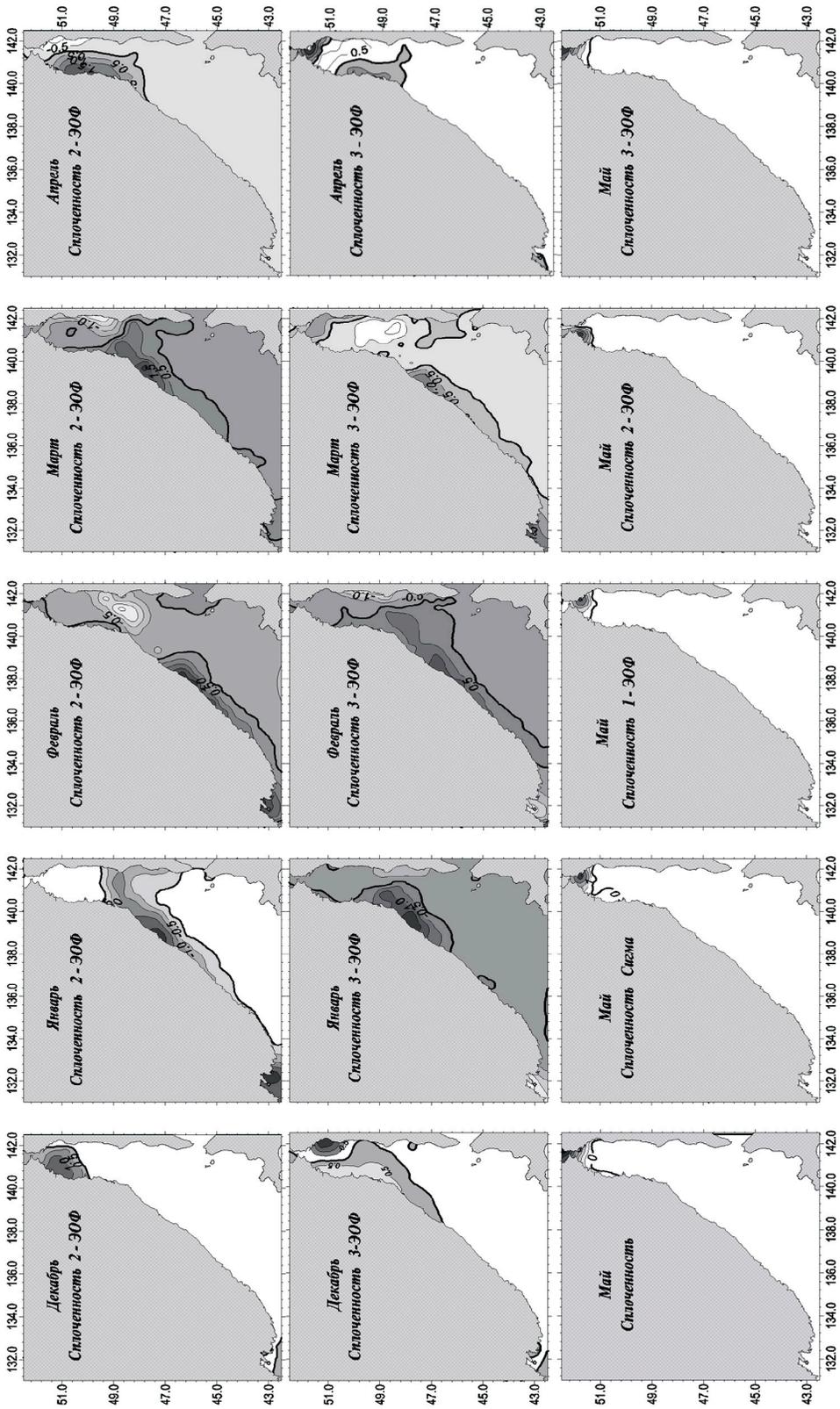


Рис. 2. Распределение средних многолетних значений (сплошность в баллах), средних квадратических отклонений (сигма) и первых трех ЭОФ сплоченности льда

Fig. 2. Mean value (points), deviation (sigma), and 3 the first EOFs for ice concentration in the Japan Sea

льдинами и т.д.) максимален. В соответствии с этим область максимальной изменчивости, следуя за смещениями зоны сплоченностью 7–8 баллов, в первой половине ледового сезона спускается к югу, а во второй — поднимается обратно на север.

В период нарастания льда (декабрь) зона наибольшей изменчивости (сигма) сплоченности локализуется на севере моря и следуя за кромкой льда смещается к югу, примерно с 51 до 48° с.ш. (рис. 2). В период относительной устойчивости ледяного покрова (январь–март) она вытягивается с северо-востока на юго-запад акватории. Одновременно севернее этой зоны формируется область с высокой сплоченностью и, соответственно, с пониженной изменчивостью. В период, когда начинают превалировать процессы таяния и разрушения льда (апрель–май), эта зона, не меняя своей ориентации, смещается обратно к северу. Распределение среднего квадратического отклонения (сигма) характеризует распределение общей изменчивости по морю. Более детальную картину — спектральное (по пространственным масштабам) распределение изменчивости сплоченности льда дает анализ основных (первых трех) эмпирических составляющих.

Поле первой ЭОФ знакопостоянно и по своему виду аналогично полю среднеквадратического отклонения. Это связано с тем, что вклад первой ЭОФ в общую изменчивость поля сплоченности доминирует над суммой вкладов остальных ЭОФ.

Для полей второй составляющей следует отметить значительную устойчивость при переходе от периода к периоду. Некоторые различия в указанных векторах проявляются только в небольшом смещении центров пучностей (они как бы растягиваются в разные стороны). В целом они свидетельствуют о разнонаправленности ледовых процессов в юго-западной и северо-восточной частях моря.

В полях третьей ЭОФ также отражены процессы противофазности развития ледовых условий, но уже в западной и восточной частях моря. При этом в период март–апрель количество пучностей возрастает — дополнительно формируется область высокой изменчивости на севере акватории. Здесь сказывается влияние множества локальных факторов: это могут быть процессы вторичного ледообразования, сжатия-разрежения или локального таяния льда внутри массивов и т.д., вносящие достаточно заметный вклад в формирование полей ледовых элементов.

В мае лед сохраняется только на самом севере моря. Соответственно все процессы изменчивости также сосредоточены на севере.

В целом с учетом морфометрических характеристик моря распределения всех характеристик ориентированы с северо-востока на юго-запад.

Сведения о временной изменчивости выделенных пространственных образований, а следовательно и самого рассматриваемого элемента, несут в себе временные коэффициенты разложения исследуемых полей по ЭОФ, а изменения временных функций отражают изменения вклада пространственных структур различного масштаба (рис. 3).

Для оценки многолетней изменчивости и периодов основных энергонесущих составляющих использовался метод наибольшей энтропии. Главное достоинство этого метода в том, что он позволяет получить статистически приемлемые результаты при относительно коротких рядах наблюдений [Уилкс, 1967].

Анализируя распределение спектральных оценок для различных временных функций в течение ледового периода (декабрь–апрель), можно отметить, что доминирующий период в многолетних колебаниях равен 2–4 годам (рис. 4). Подобную периодичность обычно связывают с 2–4-летними изменениями во взаимодействии основных центров действия атмосферы. Составляющие с таким периодом присутствуют в распределениях практически всех временных функций сплоченности льда. Кроме того, в распределениях спектральных оценок первых и вторых временных функций за исключением весеннего периода (апрель) выделяются колебания с периодом 9–12 лет, которые обычно связывают с циклом солнечной активности. Интересно наличие 15–16- и 4–6-летних циклов в распределениях третьей составляющей в переходный

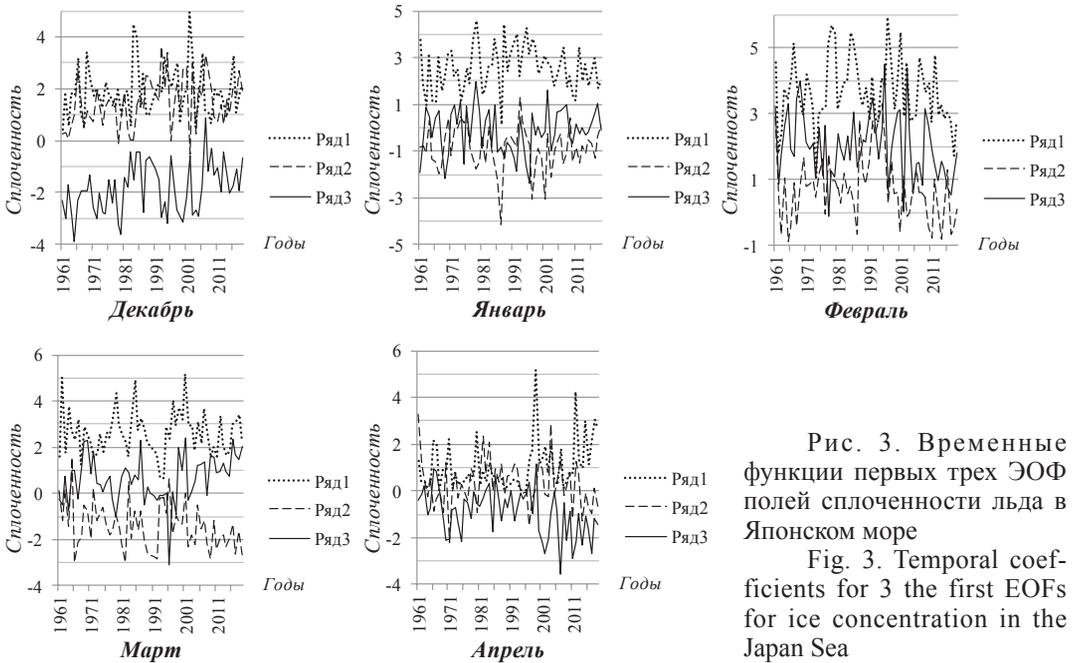


Рис. 3. Временные функции первых трех ЭОФ полей сплоченности льда в Японском море

Fig. 3. Temporal coefficients for 3 the first EOFs for ice concentration in the Japan Sea

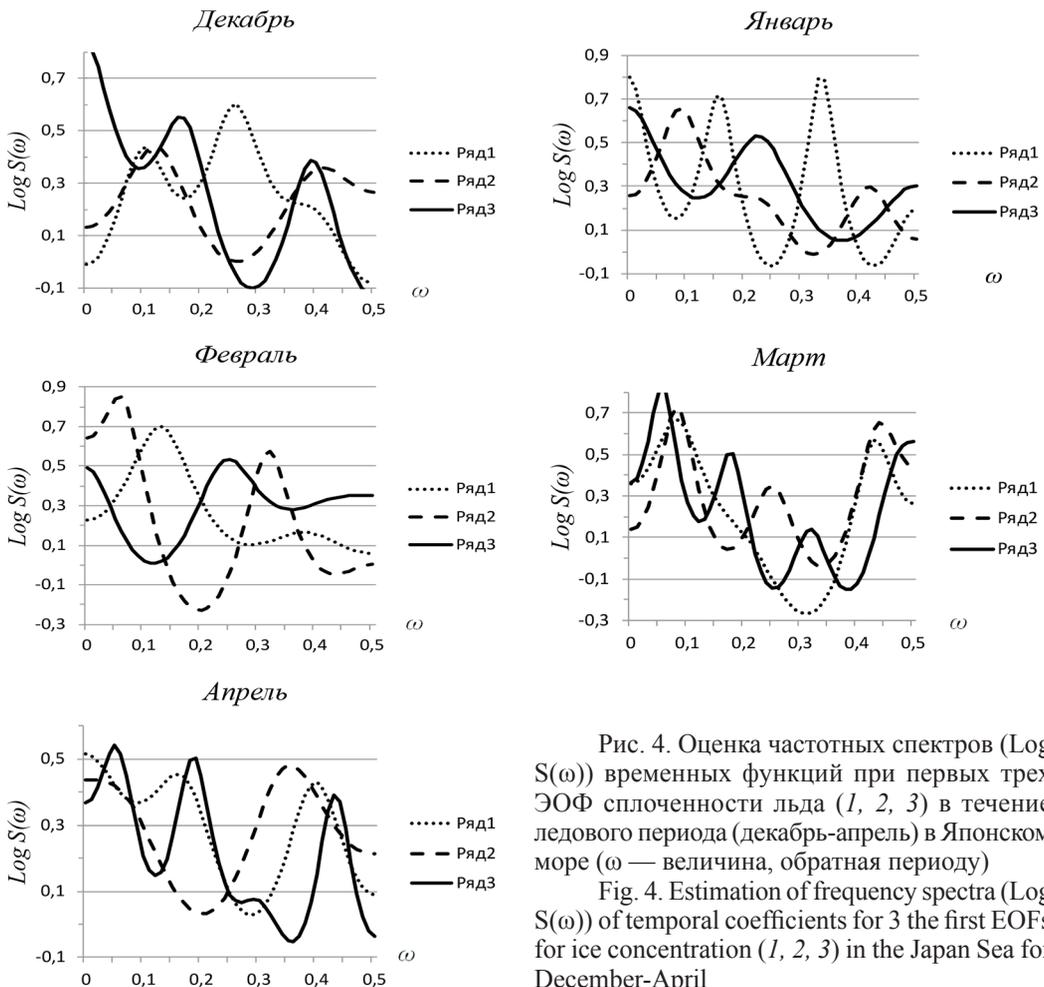


Рис. 4. Оценка частотных спектров ($\text{Log } S(\omega)$) временных функций при первых трех ЭОФ сплоченности льда (1, 2, 3) в течение ледового периода (декабрь-апрель) в Японском море (ω — величина, обратная периоду)

Fig. 4. Estimation of frequency spectra ($\text{Log } S(\omega)$) of temporal coefficients for 3 the first EOFs for ice concentration (1, 2, 3) in the Japan Sea for December-April

от зимы к весне период (март-апрель). По мере увеличения номера коэффициента разложения возрастает относительная доля энергии, приходящейся на составляющие с периодом 2–3 года. Кроме отмеченных колебаний существует целый спектр колебаний других периодов, заглушающих четкую периодичность исследуемой величины. При длине анализируемых рядов, равной 60 годам, выделенные периоды, за исключением 15–16-летнего, можно считать достоверными.

Возраст льда. Представленные распределения средних многолетних значений (рис. 5) дают более детальное (целостное) представление о распространении и возрастном состоянии ледяного покрова в море, чем ранее приведенные кривые вероятности встречи лишь с преобладающим белым льдом (по нашей классификации (табл. 1) это лед, возраст которого оценивается как 5 и более баллов) [Якунин, 2012].

При этом возрастная изолиния 5 баллов (рис. 5) в целом соответствует кривой вероятности встречи с преобладающим белым льдом [Якунин, 1979, 2012]. Помимо этого цифровой портрет, частным отображением которого является рис. 5, дает детальные сведения об общей изменчивости и ее разномасштабных составляющих в полях возраста льда по всем месяцам ледового сезона. Полученные ранее [Плотников, 2002; Плотников и др., 2011] результаты характера изменчивости возраста льда отражали лишь осредненную за выделенные ледовые периоды (несколько месяцев) картину. Кроме того, из-за дефицита данных точность расчетов оставляла желать лучшего.

Результаты расчета средних многолетних распределений возраста льда, средних многолетних отклонений и трех первых ЭОФ сплоченности льда для центральных декад каждого месяца ледового сезона представлены на рис. 5. Одновременно в табл. 3 приводятся оценки вкладов первых трех собственных векторов в суммарную изменчивость полей сплоченности льда Японского моря в различные периоды.

Таблица 3
Распределение вкладов первых трех собственных векторов в суммарную изменчивость полей возраста льда Японского моря в различные периоды, %

Table 3
Contribution of 3 the first eigenvectors into total variability of ice age in the Japan Sea, by periods, %

Месяц	Номер ЭОФ			Сумма вкладов первых трех ЭОФ
	1	2	3	
Декабрь	46,7	12,3	9,6	68,8
Январь	29,0	13,4	11,0	53,4
Февраль	34,6	8,7	8,3	51,6
Март	30,4	11,3	9,6	51,3
Апрель	37,3	11,9	9,7	58,9
Май	87,4	11,3	1,3	100

При этом более 80 % всей изменчивости полей возраста льда заключены в 6-м, 10, 10, 10, 7 и 1-м первых векторах соответственно для декабря, января, февраля, марта, апреля и мая.

Видно (табл. 3), что распределение вкладов векторов в изменчивость полей сплоченности относительно сходного для сплоченности льда (см. табл. 2) существенно не изменилось. Единственно, несколько уменьшились вклады вторых ЭОФ. Соответственно, при анализе полученных результатов (см. табл. 3) мы приходим к аналогичным выводам, что и для сплоченности льда.

Анализ приведенных распределений (см. рис. 5) показывает, что максимальная изменчивость возраста льда связана с областями 1–3-балльного возраста, где вклад термического фактора (процессы таяния или нарастания толщины льда) максимален и имеется наибольший потенциал изменения толщины льда. В соответствии с этим зона максимальной изменчивости, следуя за смещениями зоны

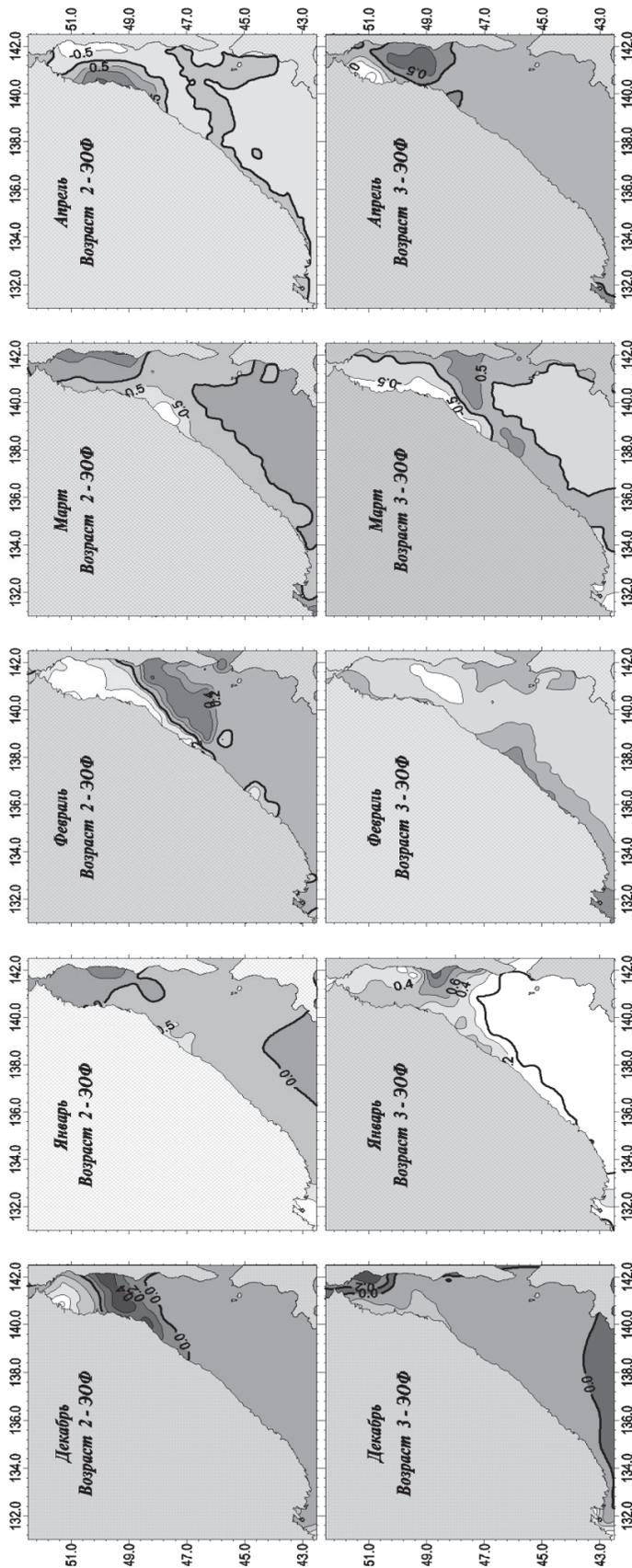


Рис. 5. Распределение средних многолетних значений, средних квадратических отклонений (сигма) и первых трех ЭОФ возраста льда
 Fig. 5. Mean value (points), deviations (sigma), and 3 the first EOFs for ice age in the Japan Sea

сплоченностью 1–3 балла, в первой половине ледового сезона спускается к югу, а во второй — поднимается обратно на север. Для полей ЭОФ возраста льда в целом характерны те же особенности, что и для полей сплоченности льда.

Отличием является то, что поля второй составляющей возраста льда отражают разнонаправленность процессов изменения толщины льда на севере и юге моря, а не на северо-востоке и юго-западе. Некоторые различия в указанных векторах проявляются только в смещении центров пучностей в течение ледового сезона.

Структура полей третьей ЭОФ изменяется в течение ледового сезона. Если в начальный период (декабрь-январь) она показывает противофазность процессов изменения толщины льда на севере и юге моря, в феврале — уже на северо-востоке и юго-западе, ну а в завершающий период — на северо-западе и юго-востоке моря. При этом количество пучностей возрастает.

Здесь сказывается влияние множества локальных факторов: это могут быть процессы вторичного ледообразования, сжатия-разрежения или локального таяния льда внутри массивов и т.д., вносящие определенный вклад в формирование полей возраста льда.

Как и при анализе временной изменчивости сплоченности льда, для оценки временной изменчивости выделенных пространственных образований (ЭОФ) возраста льда рассматривалась временная структура коэффициентов разложения исследуемых полей по ЭОФ (рис. 6), которые в дальнейшем подвергались спектральному анализу.

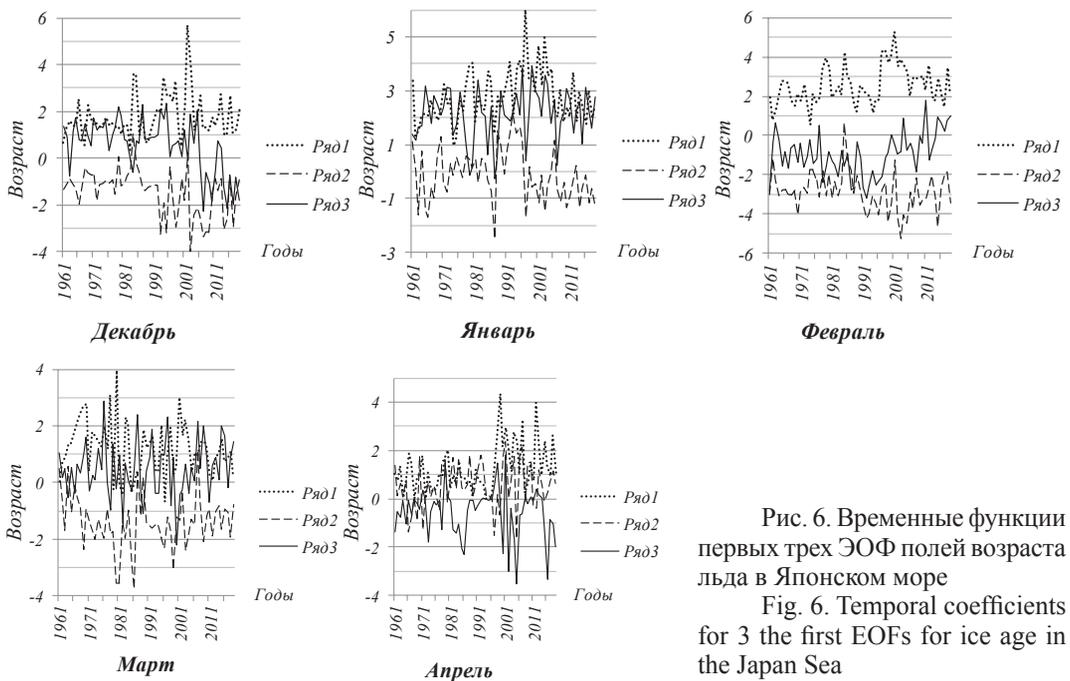


Рис. 6. Временные функции первых трех ЭОФ полей возраста льда в Японском море

Fig. 6. Temporal coefficients for 3 the first EOFs for ice age in the Japan Sea

Анализируя распределение спектральных оценок для различных временных функций в течение ледового периода (декабрь-апрель), можно отметить, что доминирующий период в многолетних колебаниях, так же как и в полях сплоченности льда, составляет 2–4 года (рис. 7). Составляющие с таким периодом присутствуют в распределениях практически всех временных функций возраста льда. Кроме того, в распределении спектральных оценок часто присутствует период 5–7 лет (первая-вторая временные функции декабря, января и апреля). Отмечаются и более низкочастотные колебания с периодом 9–11 лет, присутствующие в распределениях третьих временных функций в переходные периоды (декабрь, апрель).

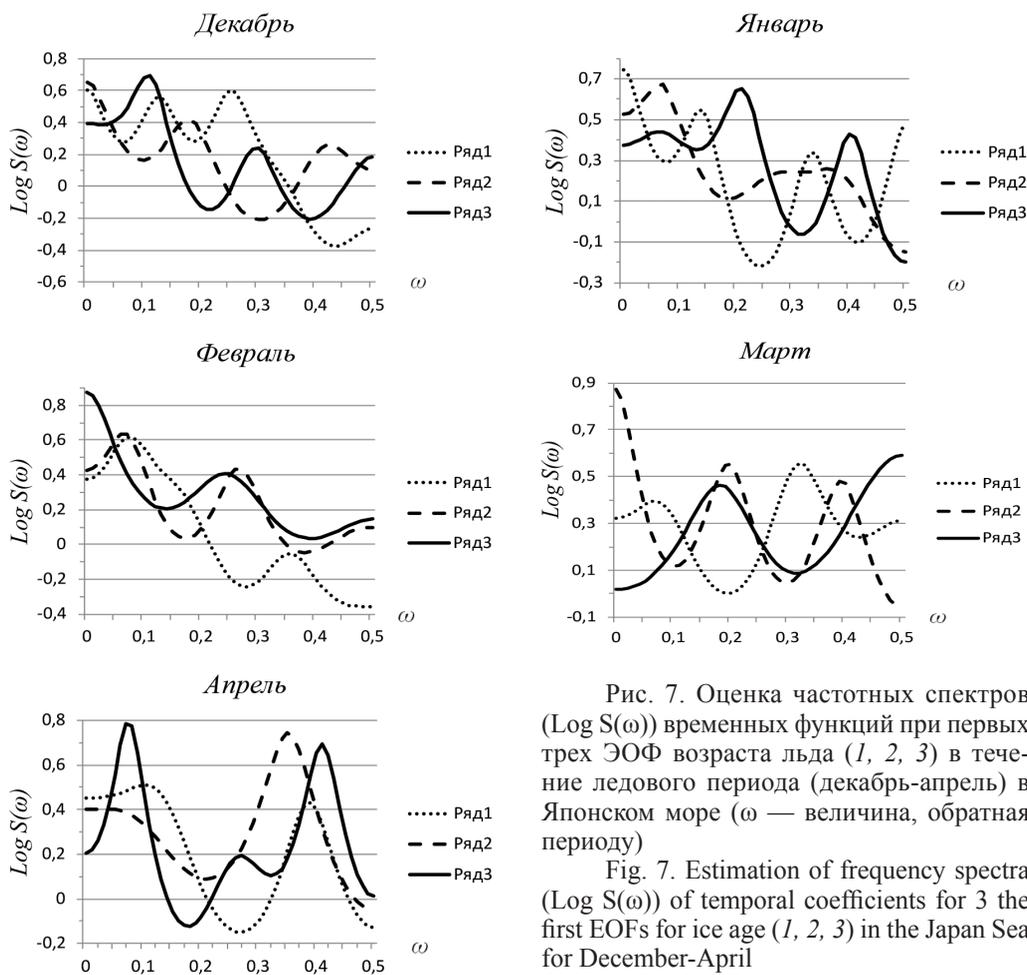


Рис. 7. Оценка частотных спектров ($\text{Log } S(\omega)$) временных функций при первых трех ЭОФ возраста льда (1, 2, 3) в течение ледового периода (декабрь-апрель) в Японском море (ω — величина, обратная периоду)

Fig. 7. Estimation of frequency spectra ($\text{Log } S(\omega)$) of temporal coefficients for 3 the first EOFs for ice age (1, 2, 3) in the Japan Sea for December-April

Выводы

Для Японского моря дополнен архив ледовой информации об основных элементах (сплоченность, возраст льда) ледового режима и представлен цифровой портрет ледяного покрова.

Формирование полей сплоченности и возраста льда происходит под воздействием одних и тех же факторов (термических и динамических), относительные вклады которых различаются от поля к полю во времени и пространстве. Поля возраста льда определяются главным образом термическими факторами, а формирование полей сплоченности складывается под воздействием как динамических, так и термических факторов. Соответственно в зонах, где максимально меняется сплоченность, основные изменения возраста еще не достигли максимального развития.

Тем не менее или благодаря этому пространственные конфигурации статистических оценок изменчивости полей сплоченности и возраста льда весьма схожи между собой.

По результатам разложения полей сплоченности и возраста льда оценена пространственная связность ледовых характеристик и выделены области синфазной и противофазной разномасштабной изменчивости. Приводятся их сравнительные оценки и вклад в общую изменчивость ледовых условий моря в течение ледового сезона. В целом, с учетом морфометрических характеристик моря, распределения всех характеристик ориентированы с северо-востока на юго-запад. При этом более 80 % всей пространственной изменчивости полей сплоченности и возраста льда заключены в 6-м, 10-, 10-, 10-, 5–7- и 1-м первых векторах соответственно для декабря, января, февраля, марта, апреля и мая.

Выделенные области достаточно постоянны во временном плане. Например, устойчивое уменьшение льда в 1990-е гг. в западной части Японского моря совпадало с увеличением или неизменностью ледовых условий в северо-восточном секторе. В целом же объем льда в море в течение последних лет оставался в пределах естественной изменчивости.

Спектральные оценки для различных временных функций разложения сплоченности льда в течение ледового периода (декабрь-апрель) показывают, что доминирующий период в многолетних колебаниях равен 2–4 годам. Составляющие с таким периодом присутствуют в распределениях практически всех временных функций сплоченности льда. Кроме того, в распределении спектральных оценок первых и вторых временных функций за исключением весеннего периода (апрель) выделяются колебания с периодом 9–12 лет, которые обычно связывают с циклом солнечной активности. Интересно наличие 15–16 и 4–6-летних циклов в распределениях третьей составляющей в переходный от зимы к весне период (март-апрель).

Аналогичные оценки относительно возраста льда отражают (как и в полях сплоченности льда) наличие доминирующей составляющей с периодом 2–4 года. Кроме того, в распределении спектральных оценок часто присутствует период 5–7 лет (первая-вторая временные функции декабря, января и апреля). Отмечаются и более низкочастотные колебания с периодом 9–11 лет, присутствующие в распределениях третьих временных функций в переходные периоды (декабрь, апрель).

Выделенные квазипериодичности открывают определенные перспективы в решении задач долгосрочных ледовых и других гидрометеорологических прогнозов в Дальневосточном регионе.

Благодарности

Выражаем благодарность рецензентам за ценные замечания, которые были учтены при подготовке настоящей рукописи к печати.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме (№ гос. регистрации: ААА-А17-117021310332-0; АААА-А17-117030110042-2). Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18–05–60104.

Соблюдение этических стандартов

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов. Библиографические ссылки на все использованные в обзоре данные других авторов оформлены в соответствии с ГОСТом.

У авторов нет конфликта интересов.

Информация о вкладе авторов

С.И. Кислова — формирование архива данных, проведение расчетов, участие в написании разделов «Материалы и методы» и «Результаты и их обсуждение», редакция и оформление статьи.

В.В. Плотников — аннотация, введение, участие в написании разделов «Материалы и методы» и «Результаты и их обсуждение», «Заключение».

В.А. Дубина — программное обеспечение расчетов, участие в написании разделов «Результаты и их обсуждение» и «Заключение», научная редакция статьи.

Список литературы

Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России : науч.-справ. пособие. — М. ; Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2017. — 640 с.

Плотников В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз: моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2002. — 167 с.

Плотников В.В. Оценка точности спутниковой информации о состоянии льда, реализуемая в схеме физико-статистического прогноза // Тез. докл. на 3-м съезде сов. океанологов. — Л., 1987. — С. 186.

Плотников В.В. Синтез разноплановой информации при формировании исторических архивов о ледовых условиях на дальневосточных морях // Современные информационные технологии для научных исследований : мат-лы Всерос. конф. — Магадан, 2008. — С. 66–67.

Плотников В.В. Эволюция ледовых условий дальневосточных (Японское, Охотское, Берингово) морей России во второй половине XX века // Вестн. ДВО РАН. — 2003. — № 2. — С. 126–133.

Плотников В.В., Подтележникова С.П. Формирование архивов ледовой информации и статистический анализ сплоченности льда в северной части Японского моря // Метеорол. и гидрол. — 2002. — № 5. — С. 40–50.

Плотников В.В., Шкорба С.П., Ростов И.Д., Дмитриева Е.В. Свидетельство о государственной регистрации базы данных «Состояние ледяного покрова Японского моря». — № 2011620558; зарегистрировано 03.08.2011 г.

Уилкс С. Математическая статистика : моногр. — М. : Наука, 1967. — 632 с.

Четырбоцкий А.Н., Плотников В.В. Ледяной покров Японского моря: анализ данных и моделирование : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2005. — 146 с.

Якунин Л.П. Атлас основных параметров ледяного покрова Японского моря. — Владивосток : Издат. дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. — 84 с.

Якунин Л.П. Ледовые исследования на дальневосточных морях // Тр. ДВНИГМИ. — 1979. — Вып. 77. — С. 102–107.

References

Dumanskaya, I.O., *Ledovye usloviya morey aziatskoy chasti Rossii* (Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia), Moscow; Obninsk: IG-SOCIN, 2017.

Plotnikov, V.V., *Izmenchivost' ledovykh uslovii dal'nevostochnykh morei Rossii i ikh prognoz* (Variability of Ice Conditions in the Far Eastern Seas of Russia and Prediction of Them), Vladivostok: Dal'nauka, 2002.

Plotnikov, V.V., Assessment of the accuracy of satellite information on the state of ice, implemented in the scheme of physical and statistical forecast, in *Tezisy dokl. 3 s'ezda sov. okeanologov* (Proc. 3rd Congress Sov. Oceanographers), Leningrad, 1987, p. 186.

Plotnikov, V.V., Synthesis of diverse information in the formation of historical archives about ice conditions in the Far Eastern seas, in in *Mater. Vseross. konf. "Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii dlya nauchnykh issledovaniy"* (Proc. All-Russ. Conf. "Modern Information Technologies for Scientific Research"), Magadan, 2008, pp. 66–67.

Plotnikov, V.V., Evolution of the ice conditions in the russian far eastern seas in the second half of the XX century, *Vestn. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2003, no. 2, pp. 126–133.

Plotnikov, V.V. and Podtelezhnikova, S.P., Ice archives and statistical analysis of ice concentration in the north of the Sea of Japan, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2002, no. 5, pp. 30–38.

Plotnikov, V.V., Shkorba, S.P., Rostov, I.D., and Dmitrieva, E.V., *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh «Sostoyaniye ledyanogo pokrova Yaponskogo morya»* (Certificate of state registration of the database "State of the Sea of Japan Ice Cover"), no. 2011620558, registered 03.08.2011.

Wilkes, S., *Matematicheskaya statistika* (Mathematical Statistics), Moscow: Nauka, 1967.

Chetyrbotsky, A.N. and Plotnikov, V.V., *Ledyanoi pokrov Yaponskogo morya: analiz dannykh i modelirovaniye* (Ice Cover in the Sea of Japan: Data Analysis and Modeling), Vladivostok: Dal'nauka, 2005.

Yakunin, L.P., *Atlas osnovnykh parametrov ledyanogo pokrova Yaponskogo morya* (Atlas of the Main Parameters of the Ice Cover in the Sea of Japan), Vladivostok: Izd. Dom Dal'nevost. Fed. Univ., 2012.

Yakunin, L.P., Ice research in the Far Eastern seas, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 1979, no. 77, pp. 102–107.

Mezhdunarodnaya simbolika dlya morskikh ledovykh kart i nomenklatura morskikh l'dov (International symbols for sea ice charts and sea ice nomenclature), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984.

Поступила в редакцию 23.03.2020 г.

После доработки 13.07.2020 г.

Принята к публикации 20.08.2020 г.