

УДК 551.467

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ БЕРИНГОВА МОРЯ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2019 г. В. В. Плотников^{1, 2*}, Н. М. Вакульская¹, В. А. Дубина¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия

*e-mail: vlad_plot@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 17.02.2018 г.

После доработки 11.06.2019 г.

Принята к публикации 18.06.2019 г.

На основе обработки и анализа всей доступной информации о состоянии ледяного покрова Берингова моря за период с 1960 по 2017 г. оцениваются различные аспекты сезонной и межгодовой изменчивости ледовитости, на основании которых исследуется возможность долгосрочного и сверхдолгосрочного моделирования ледовитости моря. Приводятся результаты испытаний и делается вывод о перспективности предлагаемой модели и возможности ее практического применения.

Ключевые слова: изменчивость ледовитости, ледяной покров, Берингово море, моделирование

DOI: 10.31857/S0030-1574596920-927

ВВЕДЕНИЕ

Ледовые условия Берингова моря являются одним из основных природных лимитирующих факторов эффективного развития региона. Поэтому совершенствование системы мониторинга ледяного покрова в море считается важнейшей научно-практической задачей.

Ледовые условия Берингова моря отличаются значительным многообразием и до настоящего времени в силу разных причин изучены недостаточно. Наиболее полное исследование ледового режима дальневосточных морей к настоящему времени выполнено Л. П. Якуниным (1978–1987 гг.) и В. В. Плотниковым (1989–2017 гг.), которыми были собраны, систематизированы и обработаны многолетние данные о характере ледовых процессов на морях и распределении основных ледовых характеристик [5, 7]. Однако постоянное пополнение базы данных о состоянии ледяного покрова диктует необходимость расширения и углубления исследований, посвященных выявлению и анализу разномасштабной изменчивости и оценки возможности моделирования ледовых условий Берингова моря.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исходной информацией при исследовании временной изменчивости ледовых условий послужили:

- карты ледовых авиаразведок над морем (1960–1996 гг.);
- гидрометеорологические ежемесячники (ежегодники) по дальневосточному региону, содержащие данные прибрежных гидрометеорологических станций и постов;
- спутниковые снимки ледяного покрова морей, получаемые с ИСЗ серий “NOAA”, “Метеор”, “Космос”, “Terra”, “Landsat” и т. п. (1972–2017 гг.).

При отсутствии сведений о ледовой обстановке в том или ином районе за отдельные декады искомые величины находились как среднезвешенные от значений элементов в соседних районах и в данном районе за предшествующую и последующую декады нескольких лет, выбранных по заданному критерию аналогичности [5]. Таким образом, ряд данных о ледовых условиях составил 58 лет (1960–2017 гг.). Ледовитость выбрана объектом исследования как наиболее наглядный, легко определяемый интегральный показатель ледового, а в более общем случае и климатического состояния акватории. Временной интервал исследования охватывал период с декабря по май, когда изменчивость ледяного покрова достаточно заметна. В остальное время исследуемая акватория в силу климатических особенностей практически свободна ото льда, и учесть его наличие можно в вероятностном плане. Соответ-

ственно, и изменчивость ледовых условий в это время близка к нулю.

СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВИТОСТИ

Наиболее существенный вклад в эволюцию ледовых процессов на замерзающих морях (в силу их инерционности) вносят внутрисезонные и межгодовые колебания [5, 8].

Сезонная изменчивость. Колебания ледовитости в годовом цикле имеют хорошо выраженный сезонный ход. На эти колебания накладываются флуктуации, обусловленные рядом региональных гидрометеорологических факторов. Для анализа процессов эволюции ледовитости сезонного характера использовалась теория периодически коррелированных случайных процессов. Вычисленные для всех декад ледового сезона среднедекадные значения позволяют представить сезонный ход процессов, а оценки средних квадратических отклонений характеризуют их изменчивость (рис. 1). Здесь же для более полного представления о характере сезонной изменчивости представлены характерные кривые сезонного хода экстремально малой и экстремально большой ледовитости (эти кривые являются огибающими распределений ледовитости по каждой декаде за все годы: экстремально большие (верхние значения) и экстремально малые (нижние значения).

Анализируя распределение оценок, можно отметить наличие ярко выраженного годового хода ледовитости и направленного роста изменчивости в течение ледового периода от декабря к маю. Максимумы ледовитости моря обычно приходится или на середину марта, или на начало апреля.

Для оценки внутрисезонной устойчивости ледовых процессов рассчитывались корреляционные матрицы распределения ледовитости (табл. 1).

Из приведенной матрицы видно, что корреляции в течение ледового сезона, как правило, сохраняют свой знак, что отражает определенную устойчивость (в статистическом смысле) возникающих тенденций в ледовых процессах. Максимальная инерционность процессов (наибольшая продолжительность значащих связей, удовлетворяющих 5%-му уровню значимости) связана с периодами максимального развития ледовитости. Для Берингова моря это период с конца января по апрель. Радиус значащих кор-

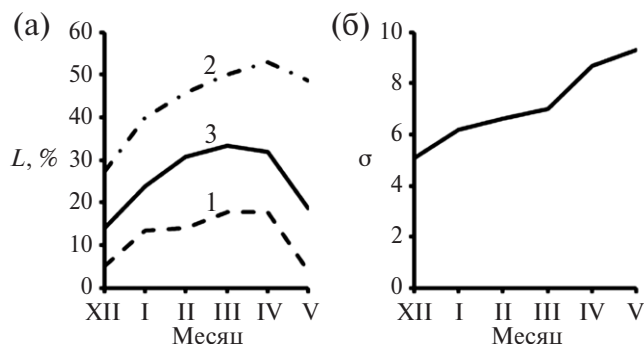


Рис. 1. Сезонное распределение: (а) — экстремально малой (1), экстремально большой (2) и средней (3) многолетней ледовитости; (б) — среднего квадратического отклонения ледовитости Берингова моря.

реляций в эти периоды достигает 9–12 декад, т.е. состояние ледовых условий именно в этот период и определяет дальнейшую эволюцию ледовых процессов. Наименьшая инерционность процессов отмечена в начале ледового периода, что легко объясняется исходной неустойчивостью процессов в этот период, когда даже незначительные возмущения внешних факторов могут привести к радикальному перераспределению только образовавшегося ледяного покрова. Подобный факт, правда, в несколько меньшей мере, характерен и для конца ледового периода.

Межгодовая изменчивость. В плане анализа межгодовой изменчивости особенно интересным представилось оценить существование направленной тенденции в развитии ледовых условий, а также выявить более мелкомасштабные квазипериодические ее составляющие.

Компоновка рядов ледовитости для оценки многолетней изменчивости проводилась следующим образом: из совокупности месячных данных извлекались значения, отстоящие друг относительно друга на период, равный одному году (рис. 2). По ним на первом этапе проверялась гипотеза о наличии трендовой составляющей.

Для этой цели использовался фильтр, выделяющий линейную функцию времени $\varphi(t)$ из смеси с белым шумом [6]. Весовая функция этого фильтра (h) имеет вид:

$$h(n-1) = \frac{6}{n^2} \left(\frac{2t}{n} - 1 \right), t = 1, 2, \dots, n,$$

где n — объем выборки, t — время.

Среднеквадратичная погрешность (σ_α) оценки угла наклона (α) есть:

Таблица 1. Корреляционная матрица связи декадных значений ледовитости Берингова моря в течении ледового периода (декабрь—май)

Месяц	Декабрь			Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Декабрь	I	1.00																	
	II	0.71	1.00																
	III	0.59	0.63	1.00															
Январь	I	0.24	0.48	0.71	1.00														
	II	0.34	0.50	0.60	0.80	1.00													
	III	0.29	0.43	0.58	0.57	0.78	1.00												
Февраль	I	0.08	0.24	0.52	0.46	0.63	0.79	1.00											
	II	0.27	0.18	0.41	0.29	0.48	0.54	0.75	1.00										
	III	0.23	0.29	0.39	0.44	0.45	0.53	0.61	0.77	1.00									
Март	I	0.07	0.14	0.21	0.21	0.36	0.40	0.42	0.68	0.74	1.00								
	II	0.04	-0.03	0.20	0.27	0.28	0.45	0.46	0.67	0.63	0.83	1.00							
	III	0.19	0.36	0.52	0.40	0.49	0.64	0.61	0.65	0.61	0.75	0.85	1.00						
Апрель	I	0.23	0.29	0.55	0.42	0.47	0.61	0.64	0.68	0.60	0.69	0.76	0.89	1.00					
	II	0.25	0.18	0.57	0.37	0.41	0.58	0.61	0.71	0.66	0.70	0.74	0.87	0.90	1.00				
	III	0.22	0.25	0.54	0.35	0.45	0.56	0.62	0.73	0.67	0.67	0.70	0.84	0.83	0.89	1.00			
Май	I	0.19	0.29	0.41	0.41	0.51	0.61	0.60	0.70	0.68	0.71	0.72	0.85	0.81	0.86	0.88	1.00		
	II	0.11	0.16	0.33	0.39	0.46	0.53	0.54	0.64	0.64	0.74	0.62	0.78	0.80	0.77	0.77	0.92	1.00	
	III	0.00	0.18	0.19	0.26	0.28	0.35	0.53	0.66	0.57	0.55	0.57	0.65	0.71	0.71	0.65	0.74	0.76	1.00

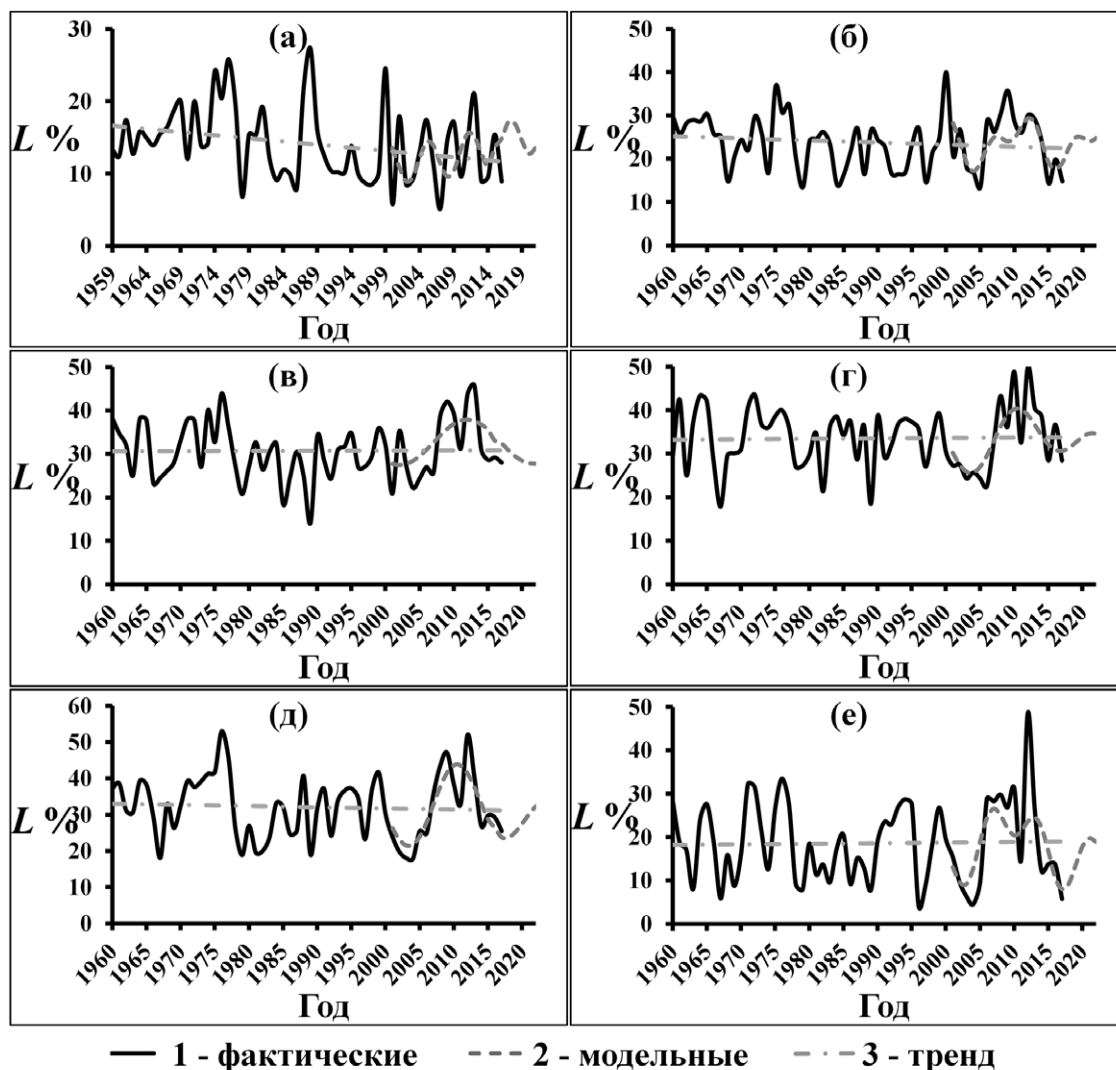


Рис. 2. Многолетние распределения ледовитости (1 — фактические, 2 — модельные и 3 — трендовой составляющей) в течение ледового периода (декабрь (а), январь (б), февраль (в), март (г), апрель (д), май (е)) Берингова моря.

$$\sigma_{\alpha} = \left(\frac{12\sigma_t^2}{n^3} \right)^{1/2},$$

где σ_t^2 — дисперсия анализируемого временного ряда после исключения тренда. Тренд считался статистически значимым, если модуль угла наклона ($|\alpha|$) превышал $2\sigma_{\alpha}$ (на 5%-м уровне значимости). Расчетные параметры, полученные для рядов среднемесячной ледовитости, приведены в таблице 2.

Статистический анализ представленных рядов (за исключением декабря) не показал наличие заметных линейных трендов в многолетних распределениях ледовитостей. Это позволило сделать вывод, что в общей оценке ледовых условий не зафиксировано статистически значимо-

го их изменения. Вместе с тем можно отметить некоторые изменения характера внутрисезонных процессов:

- повышение интенсивности процессов развития ледяного покрова в феврале-марте и замедление процессов разрушения льда в мае (угол наклона α трендовой составляющей положительный);
- замедление процессов продуцирования льда в декабре-январе и повышение интенсивности процессов разрушения льда в апреле (угол наклона α трендовой составляющей отрицательный).

Для выявления и анализа возможных квазипериодических составляющих многолетней изменчивости ледовых процессов вычислялись

Таблица 2. Внутрисезонное распределение статистических оценок ледовитости Берингова моря (1960–2017 гг.)

Оценки	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
$L_{\text{ср}}$	14.1	23.8	30.7	33.5	32.10	18.6
σ_t	5.1	6.2	6.6	7.0	8.7	9.3
α	-0.075	-0.041	0.004	0.009	-0.028	0.010
σ_α	0.038	0.049	0.052	0.055	0.068	0.073
Критерий Стьюдента	-1.94	-0.85	0.09	0.17	-0.41	0.13
$P, \%$	94.8	60.0	7.0	13.8	32.0	10.6

Примечание. В таблице $L_{\text{ср}}$ — среднее значение ледовитости, σ_t — среднеквадратическое отклонение, α и σ_α — параметры линейного тренда (угол наклона и среднеквадратичная погрешность оценки угла наклона соответственно), критерий Стьюдента — для оценки значимости угла наклона линии тренда, P — вероятность наличия линейного тренда.

статистические оценки межгодовых корреляционных функций ледовитостей, границы их доверительных интервалов (при доверительной вероятности 95%), а также нормированных частотных спектров.

Как следует из графиков (рис. 3), время релаксации автокорреляционных функций, как правило, превышает дискретность данных (один год).

Наряду с этим в распределении автокорреляционных функций отмечаются черты, свойственные квазипериодическим составляющим. Данное предположение находит свое подтверждение при рассмотрении графиков частотных спектров. Выделяются составляющие с периодами около 2–3, 6–8, 10–12 лет и более.

Первую (2–3 года) обычно связывают с изменениями во взаимодействии основных центров

действия атмосферы, хотя конкретные физические корни этого явления до конца еще не выяснены [1, 2, 5]. Колебания с периодами около 7 лет, возможно, являются результатом биения, возникающего в атмосфере и гидросфере планеты в случае наложения на систему сезонных или годовых явлений волны полюсного прилива. Кроме того, возможно, эта составляющая является откликом на возмущения в системе “океан — атмосфера”, кратные 3.5 годам и связанные с явлением Эль-Ниньо. Наличие пиков спектральной плотности на периодах около 11 и 22 годов, очевидно, связано с гелиогеофизическими факторами. Выраженное действие сил гелиогеофизической природы, отмечаемое во многих климатических системах, служит также весомым подтверждением существования аналогичных периодов в изменчивости

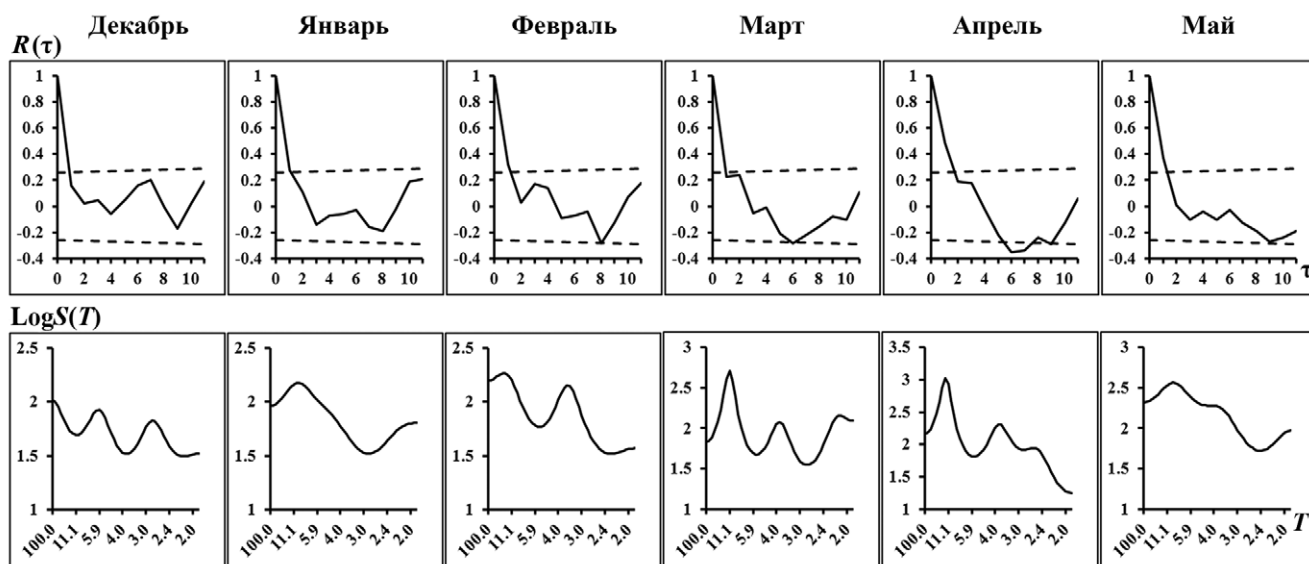


Рис. 3. Оценка корреляционных функций $R(\tau)$ (пунктирные линии — границы доверительных 95% интервалов) и частотных спектров $\text{Log}S(T)$ ледовитости в течение ледового периода (декабрь–май) Берингова моря, где T — период.

ледовитости морей как Тихоокеанского, так и Арктического бассейнов [1–6].

Кроме того, во временном аспекте наблюдается заметная неравномерность распределения весов отдельных циклических составляющих изменчивости. Если в периоды нарастания объемов льда преобладают процессы с 6–8-летней периодичностью, то в периоды разрушения льда прослеживается сдвиг энергонесущих характеристик в область более низких частот, и начинают преобладать колебания с периодами около 11 лет.

Кроме отмеченных периодичностей, имеется и ряд вторичных циклов, которые, вероятно, являются обертонами основных колебаний, и относительный вклад их в общую изменчивость существенно ниже.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ДОЛГОСРОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕДОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Для целей долгосрочного планирования несомненный интерес представляет оценка ожидаемого количества льда на той или иной акватории региона с высокой заблаговременностью (год и более), на основании которой уже можно делать определенные заключения о возможном характере развития ледовых процессов в наиболее перспективных районах и пытаться детализировать характер ледовых условий.

При создании и реализации моделей многолетней (год и более) изменчивости природных процессов (ледовых условий), как правило, трудно отыскать внешние по отношению к анализируемому объекту предикторы, обладающие достаточной информативностью, поэтому перспективным путем построения долгосрочных моделей является поиск и использование скрытых в самом прогнозируемом процессе квазипериодичностей. Однако отсутствие конкретных периодов в исследуемом процессе не позволяет использовать традиционные методы гармонического анализа [2, 7]. Для квазипериодических (слабопериодических) процессов более адекватные результаты можно получить, используя разложение в ряд с некратными гармониками [2, 7].

Соответственно, в качестве модели может быть использована суперпозиция этих гармоник. При этом в каждом конкретном случае параметры квазипериодических составляющих и их веса в общей изменчивости ледовитости пересчитываются.

АЛГОРИТМ МОДЕЛИ

Распределение ледовитости представлялось в виде гармонического ряда с некратными частотами:

$$L_i = A_0 + \sum_{m=1}^p A_m \sin\left[\left(\frac{2\pi}{T_m} + (m-1)t_i + Q_m\right)\right].$$

Здесь A_m — амплитуда, T_m — период и Q_m — сдвиг — параметры определяемые методом наименьших квадратов, $i = 1, 2, \dots, n$; $m = 1, 2, \dots, p$, где n — длина ряда, p — количество используемых гармоник, t — момент времени фиксации ледовитости [6].

Для решения задачи выделения оптимального ряда гармоник сначала из основного процесса (обучающая последовательность — 1960–2000 гг.) выделялись несколько первых гармоник (рассчитывались амплитуды и частоты), из которых выбиралась одна по критерию минимума среднеквадратической ошибки (σ), полученной на проверочной последовательности (данные 2001–2017 гг.). Затем значение отобранной первой гармоники вычиталось из анализируемого процесса, и формировались первые разности (Δ), из которых по тем же принципам отбиралась вторая гармоника и т.д. Процесс отбора гармоник продолжался до тех пор, пока ошибка (σ) на проверочной последовательности от итерации к итерации уменьшалась не менее чем на 5% от первоначальной. В результате находится наиболее приемлемое представление детерминированной составляющей квазипериодического процесса в виде некоторого квазигармонического тренда, состоящего из суммы нескольких гармоник с некратными частотами.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используя предложенный алгоритм, была сделана попытка адаптивного оценивания ледовитости Берингова моря на период с 2001 по 2022 г. с заблаговременностью один год. В модели учитывалось около 90% изменчивости исходного процесса. Количество отбираемых гармоник при такой точности прогноза варьировалось от 2 до 7. Моделировались средние за центральную декаду месяца значения ледовитости с декабря по май (рис. 2).

Использовался адаптивный алгоритм расчета. Например, при оценке ледовитости за 2001 г. (заблаговременность один год) в качестве обучающей выборки использовались данные с 1960 по 2000 г. При моделировании на 2002 г. обучающая

выборка увеличивалась на один год и включала сведения о распределении ледовитости за 1960–2001 г. и так далее. Соответственно, при оценке за 2018 г. обучающая выборка уже включала данные за 1960–2017 гг., т.е. объем обучающей совокупности постоянно наращивался.

Одновременно проверялось соответствие характера развития ледового процесса внутри сезона с учетом полученных оценок взаимосвязей (табл. 2). Для этого модельные значения ледовитости соседних декад сравнивались между собой, и если разница между ними превышала критическое значение (2σ), что свидетельствует о смене типа ледовых условий, то последующее значение ледовитости корректировалось в рамках линейной однофакторной авторегрессионной модели вида

$$L_{n+1} = a_0 + a_1 L_n,$$

где a_0 и a_1 — коэффициенты уравнения авторегрессии, рассчитанного по обучающей выборке, L_n и L_{n+1} — текущее и последующее значения декадной ледовитости внутри ледового сезона прогнозируемого года.

В результате была сформирована база данных зависимых и независимых (за 17 лет с декабря 2000 по май 2017 г.) модельных оценок распределений декадных ледовитостей Берингова моря, полученных с заблаговременностью один год.

Оценки обеспеченности результатов модели прогноза среднемесячных (декабрь–май) значений ледовитости с заблаговременностью один год показали весьма обнадеживающие результаты. Обеспеченность оказалась в пределах от 75% (март) до 86% (февраль). При этом обеспеченность климатологических прогнозов составляет около 59%, т.е. эффективность модели достаточно очевидна. Оправдываемость модельных результатов оказалась не намного ниже и составила: 71% в декабре; 82% в январе; 76% в феврале и марте; 88% в апреле и 82% в мае.

ВЫВОДЫ

Статистический анализ представленных рядов (за исключением декабря) не показал наличия выраженных линейных трендов в многолетних распределениях ледовитостей. Это позволило сделать вывод, что в общей оценке ледовых условий не отмечено тенденции изменения режимных характеристик (климата).

Показано, что доминирующий вклад в формирование ледовых процессов на Беринговом море вносят квазипериодические составляющие с периодами около 2–3, 6–8 и 10–12 лет.

Разумеется, представление о крупномасштабной изменчивости ледовитости в связи с ограниченностью анализируемого материала еще будет уточняться, однако, учитывая наличие подобных колебаний, выделенных рядом других исследователей для различных гидрометеорологических характеристик, а также тот факт, что обстановка с накоплением информации в ближайшее время радикально не изменится, а проводить исследования необходимо, то проведенная работа может внести определенный вклад в процесс понимания функционирования такой сложной климатической системы, как северная часть Тихого океана.

Анализ исходных и модельных распределений свидетельствует об определенной стационарности ледовых процессов на Беринговом море: отсутствие многолетних трендов в прошлом (по имеющимся данным) и их предполагаемое отсутствие в будущем (по модельным расчетам).

Основные ошибки при моделировании ледовых условий (ледовитостей) связаны с непредсказуемой аномальностью ледовых процессов в течение конкретного ледового сезона (смены типа ледового процесса). Это наиболее ярко проявилось на Беринговом море в зимы 1964–1965, 1988–1989 и 2011–2012 гг. В эти годы активное развитие ледовитости продолжалось лишь до середины февраля, после чего количество льда в море резко уменьшилось. Как оказалось при дальнейшем анализе, данный процесс был связан с трансформацией основных центров действия атмосферы Северного полушария, в частности тихоокеанского максимума и алеутской депрессии.

Тем не менее, базируясь на полученных оценках, можно заключить, что в целом предложенная модель прогноза достаточно адекватно отражает многолетнюю изменчивость ледовитости Берингова моря, выделяет аномальные годы и может быть использована при долгосрочном планировании в различных отраслях хозяйственной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В. Ф., Макитас А. П., Романов А. А. и др. Морской лед, как объект климатических исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 1991. № 66. С. 250–263.

2. *Ивахненко А. Г.* Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. К.: Изд-во. Техника, 1975. 312 с.
3. *Корт В. Г.* О крупномасштабных взаимодействиях океана и атмосферы (на примере северной части Тихого океана) // *Океанология*. 1970. Т. X. № 2. С. 231-239.
4. *Максимов И. В., Саруханян Э. И., Смирнов Н. П.* Космогеофизический фон макропроцессов в океане и атмосфере и сверхдолгосрочный прогноз // *Климатология и сверхдолгосрочный прогноз*. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 18-25.
5. *Плотников В. В.* Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз. Владивосток: Дальнаука, 2002. 172 с.
6. *Привальский В. Е.* Климатическая изменчивость (стохастические модели, предсказуемость, спектры). М.: Наука, 1985. 184 с.
7. *Сахарович Я. И.* О закономерностях и возможностях долгосрочного прогнозирования географических процессов // *Автоматика*. 1972. № 5. С. 20-34.
8. *Якунин Л. П.* Ледовые исследования на дальневосточных морях // *Тр. ДВНИГМИ*. 1979. Вып. 77. С. 102-107.

VARIABILITY OF ICE CONDITIONS OF THE BERING SEA AND ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF THEIR MODELLING

© 2019 V. V. Plotnikov^{1, 2*}, N. M. Vakulskaya¹, V.A. Dubina¹

¹ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

² Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia

*e-mail: vlad_plot@poi.dvo.ru

Received February 17, 2018

Revised version received June 11, 2019

After revision June 18, 2018

Various aspects of seasonal and interannual variability of the sea ice cover are estimated on the basis of all available the Bering Sea ice data from 1960 to 2017. The possibility of long-term and superlong-term modeling of the ice cover is investigated. Results of tests are given, and a conclusion about prospects of the proposed model and an opportunity of its practical application is done.

Keywords: ice cover variability, the ice cover, the Bering Sea, modeling