

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-99-114>

УДК 551.467.3(265.53)

Исследование изменений климатических норм в долгосрочном прогнозе ледовитости Охотского моря

Г.И. Анжина, А.Н. Вразкин

*Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Владивосток, Россия
anzhinagi@mail.ru*

Отмечено сходство в динамике и количественное различие режима ледовитости за четыре последовательных 30-летних периода: 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020 гг. Наибольшие отличия наблюдаются в режимных характеристиках первого и последнего периодов. Абсолютный максимум или минимум, зафиксированный хотя бы в одном из месяцев с января по май, определяет характер ледовитости всего ледового сезона. Исследована чувствительность прогностической физико-статистической модели к изменениям климатических норм. Получены оценки качества прогнозов среднемесячной ледовитости.

Ключевые слова: базисный период, долгосрочный прогноз, физико-статистическая модель, ледовитость, режимные характеристики, типизация, оценки качества прогноза

Studying changes in climate normal in long-term forecasting of the Sea of Okhotsk ice cover

G.I. Anzhina, A.N. Vrazhkin

*Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute,
Vladivostok, Russia
anzhinagi@mail.ru*

There is a similarity in dynamics and a quantitative difference in the ice cover regime in four consecutive 30-year periods: 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020 are noted. The greatest differences are observed in the regime characteristics of the first and the last periods. The absolute maximum or minimum recorded in at least one of the months from January to May determines the nature of the ice cover of the entire ice season. The sensitivity of the predictive physical-statistical model to the replacement of climatic norms has been investigated. Estimates of the quality of forecasts of the average monthly ice cover are obtained.

Keywords: base period, long-term forecast, physical and statistical model, ice cover, climate characteristics, typification, forecast skill scores

Введение

В климатологии при рассмотрении аномалий какого-либо параметра указывается период, на котором была рассчитана «норма». Всемирная метеорологическая организация (ВМО) рекомендует на практике рассчитывать климатологические стандартные нормы (КСН) [12] как средние данные за ближайший к текущему времени 30-летний базисный период (БП), который завершается годом с последней цифрой 0. За временной промежуток 1961–2020 гг. может быть сформировано четыре базисных периода: 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020 гг.

Период с 1961 по 1990 г. используется как стандартный опорный период для долгосрочной оценки изменений климата. В Руководящих указаниях ВМО [12] отмечается, что эффективность прогнозирования изменений климатических норм будет выше, если они обновляются чаще. Например, период осреднения с 1981 по 2010 г. будет с большей вероятностью репрезентативным для современных условий, чем период с 1961 по 1990 год. Это же утверждение подтверждается Г.В. Грузой и Э.Я. Раньковой [5] на примере расчета оценок базовых климатических характеристик среднемесячной температуры приземного воздуха на территории России. На основе анализа данных авторы обосновывают необходимость учета наблюдаемых изменений климата как в методологии прогнозирования, так и при оценке качества прогнозов. Предлагается использовать «динамические климатические нормы», которые уже не содержат ни межсезонных, ни текущих многолетних трендов (изменений климата).

В настоящее время в ФГБУ «ДВНИГМИ» в оперативном режиме осуществляется долгосрочный прогноз ледовитости и кромки льда в акваториях дальневосточных морей с заблаговременностью 7 и более месяцев [1–4]. Методы прогнозирования этих ледовых параметров основаны на использовании физико-статистической модели. При ее создании периодом для получения стандартных статистических параметров (ССП), включающих КСН и среднеквадратическое отклонение от нормы (σ), послужило 30-летие 1971–2000 годов.

Сформированные к настоящему времени архивы данных позволяют в соответствии с алгоритмом построения методов (наличием независимой выборки при генерировании ансамбля прогнозов) использовать для расчетов СПП базисный период 1981–2010 гг. Однако прежде следует оценить, насколько при переходе от одного базисного периода к другому могут изменяться результаты расчетов по действующей прогностической модели. Необходимость оценки возникла потому, что значения аномалий используются не только при анализе выходной продукции, но в самой модели при выявлении информативных предикторов в полях гидрометеопараметров [7].

Предварительно в данном исследовании на примере расчета статистических характеристик средней месячной ледовитости Охотского моря

за месяцы с наиболее устойчивым ледяным покровом (с декабря по май) были рассмотрены особенности режимов ледовых условий в упомянутых выше базисных периодах. Помимо этого, была оценена успешность применения ССП каждого из четырех базисных периодов в прикладных целях (при типизации и климатологическом прогнозе).

Ранее [8] был выполнен анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря, вычисленных относительно стандартного опорного периода. Для проведения исследования авторы подготовили уникальный ряд значений ледовитости Охотского моря с 1882 по 2015 г. с использованием различных источников информации: судовой (1929–1960 гг.), авиационной (1957–1992 гг.), спутниковой (1971–2015 гг.). Установлено, что точность расчета ледовитости по судовым и авиационным наблюдениям и по авиационным и спутниковым наблюдениям вполне сопоставима и в среднем не превышает 1–2 % площади моря. Данные по ледовитости Охотского моря за период с 1882 по 1928 г. реконструированы и квалифицируются как качественные. Анализ многолетних изменений проводился для сезонных значений ледовитости, рассчитанных «усреднением месячных значений площадей ледяного массива с декабря по май».

Исходя из представленного разделения ряда по источникам получения информации, наши данные относятся к этапам авиационных и спутниковых. Их описание можно найти в [16]. Хотя количественного сопоставления рядов ледовитости не проводилось, но можно предположить, что тенденция в многолетних изменениях этого параметра должна сохраняться. Поэтому при обсуждении результатов данного исследования, относящихся к режиму ледовитости Охотского моря, мы будем обращаться для сравнения к материалам [8].

Материалы и методы

Существующие в нашем распоряжении архивные данные позволили рассмотреть режимные характеристики ледовитости Охотского моря (выраженной в процентах от площади акватории) в четырех рекомендованных ВМО базисных периодах (БХХ): Б61, Б71, Б81, Б91. В принятых сокращениях ХХ обозначают последние две цифры года начала базисного периода. Также при анализе использовался 60-летний период с 1961 по 2020 г. (А60), объединяющий эти БП. На временном ряду А60 определены абсолютный максимум (A_{\max}) и абсолютный минимум (A_{\min}) ледовитости в Охотском море.

На упомянутых данных по каждому месяцу ледового сезона были проведены расчеты ССП, коэффициентов вариации (c_v), рассчитанных как отношение среднеквадратического отклонения к климатологической стандартной норме, выраженное в процентах, а также определено максимальное и минимальное значения ледовитости.

Для сравнения успешности применения ССП базисных периодов при климатологическом прогнозе и типизации была использована 10-летняя

проверочная выборка ледовитости (сезоны 2010/2011 – 2019/2020 гг.). Для методических прогнозов средней месячной ледовитости выбран временной период 2011/2012 – 2019/2020 гг.

Показателями успешности методических, а также климатологических прогнозов послужили оправдываемость ($P\%$) и абсолютная ошибка (δ), вычисляемая как абсолютная разность прогностического и фактического значений ледовитости. Оценка проводилась по критериям, представленным в Наставлении [11] и Методических указаниях [10].

Особенности режима ледовитости Охотского моря за период 1961–2020 гг.

В [8] представлен график многолетнего изменения сезонной ледовитости Охотского моря. На нем выделены периоды роста с 1958 по 1980 г. и дальнейшего уменьшения значений сезонной ледовитости до 2015 года. Аналогичная тенденция отмечается на графике интегральной кривой аномалий ледовитости Охотского моря, вычисленных относительно климатической нормы 1961–1990 гг., и в сглаженном по 24 годам многолетнем ходе аномалий ледовитости Охотского моря.

Интегральные кривые отклонений среднегодовых значений сезонной площади льда Охотского моря, представленные в [15], также демонстрируют периоды аномального увеличения и уменьшения площади льда в Охотском море. Преобладание зим с суровыми условиями отмечалось с 1958 г. до середины 80-х годов. С 1984 по 2014 г. в Охотском море отмечалось уменьшение площади ледяного покрова как в период формирования тяжелых льдов (с середины января), так и в период их активного разрушения (с апреля до середины мая). Исходя из этого, можно априори предположить, что между вариантами Б61 и Б81 (Б91) будут отмечаться значительные различия: большая часть Б61 попадает на период увеличения ледовитости, а Б81 (Б91) – на период уменьшения ледовитости. Б71 является промежуточным, поэтому будет иметь как черты Б61, так и Б81 (Б91). В [8] также отмечается, что нормы ледовитости, рассчитанные по усредненным за сезон данным для Б71 и Б81, существенно отличаются от норм для Б61.

В настоящей работе проведено количественное сравнение динамики ледовитости для базисных периодов по каждому месяцу ледового сезона (с декабря по май), обращая особое внимание на Б71 и Б81. В качестве характеристик ледовых условий в Охотском море рассматривались распределения: климатологической стандартной нормы, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации, максимальных и минимальных значений ледовитости (рис. 1). В дальнейшем для этих величин используются принятые выше обозначения.

В месяцы с января по май прослеживается четкая тенденция к уменьшению КСН от Б61 к Б81 (Б91) (рис. 1а). Разница между нормами Б61 и Б81 изменяется от 5,0 % в январе до 9,0 % в апреле, а отличия КСН

Б61 и Б91 еще больше, до 12,6 % в апреле. Только в декабре климатологическая стандартная норма Б61 на 0,6 % меньше Б81. Для Б71 нормы в месяцы сезона занимают промежуточные значения между Б61 и Б81. Наибольшие значения КСН для базисных периодов отмечаются в марте (с максимумом для Б61), а минимальные – в мае для Б71, Б81 и Б91. Для Б61 минимальные значения ледовитости наблюдаются в декабре.

Для σ (рис. 1б) такой четкой тенденции не отмечается, однако некоторая особенность проявляется в повышенной изменчивости Б71 в первой половине сезона по сравнению с Б61, Б81 и Б91. Также с декабря по февраль величина σ Б81 превышает Б91.

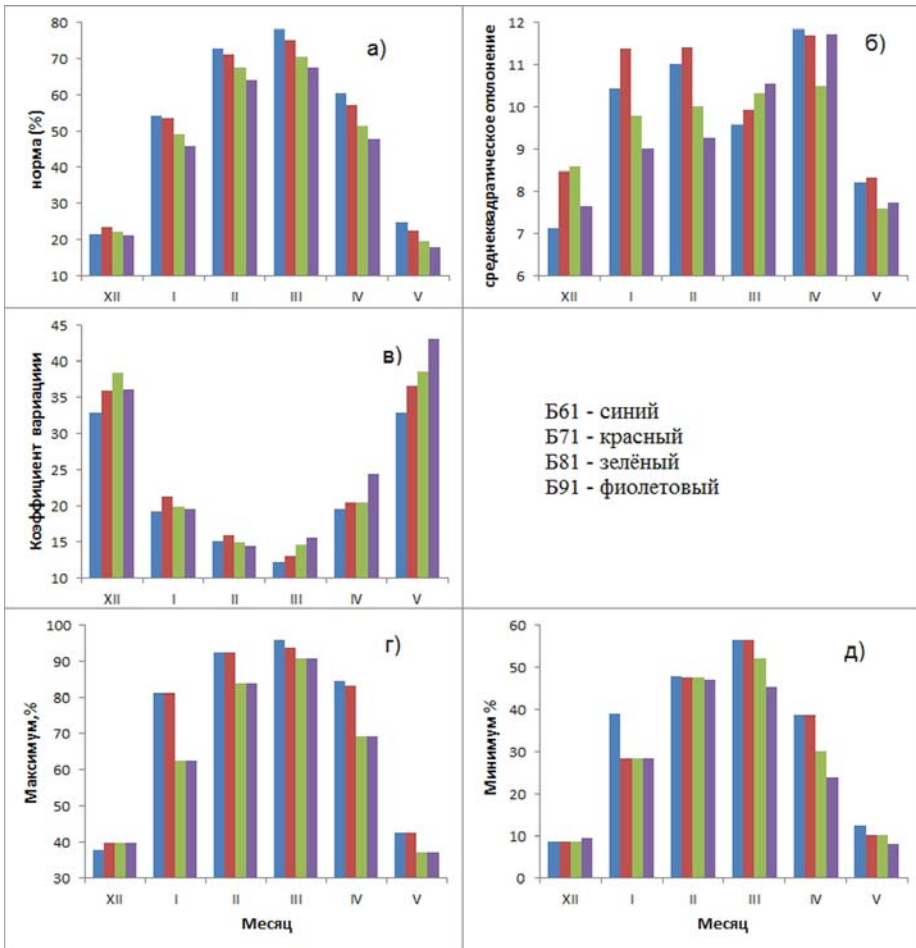


Рис. 1. Распределение климатологических стандартных норм (а), σ (б), c_v (в), максимальной (г) и минимальной (д) ледовитости в Охотском море.

Fig. 1. Distribution of climatological standard norms (a), σ (б), c_v (в), maximum (г) and minimum (д) ice cover in the Sea of Okhotsk.

Степень рассеивания значений коэффициента вариации (рис. 1в) в начале и конце ледового периода (декабрь, май) в четырех выборках (Б61, Б71, Б81, Б91) является самой большой. В другие месяцы c_v изменяется от 12 до 25 %, т. е. КСН действительно характеризуют данные выделенных базисных периодов. В Б81 отмечается более заметный разброс отклонений от среднего, чем в выборке Б61 во всех месяцах ледового сезона. Выборка Б71 более вариабельна, чем Б81 и Б91 в январе и феврале.

В месяцы с января по май максимальная ледовитость (рис. 1г) принимает наименьшие значения в Б81 и Б91. Максимум Б71 несколько меньше в марте и апреле, чем в период Б61, а в январе, феврале и мае – на одном уровне. В декабре максимум в Б61 меньше, чем в других базисных периодах.

Внутри сезона величина минимальной ледовитости (рис. 1д) в целом уменьшается от Б61 к Б91, что наиболее ярко проявилось в январе и второй половине ледового сезона.

На периоде 1961–2020 гг. были выявлены исторические экстремумы значений ледовитости по каждому месяцу. Зафиксированные абсолютные максимумы (A_{\max}) ледовитости приходятся на годы, отмеченные как период положительной аномалии, а абсолютные минимумы (A_{\min}) – как период отрицательной аномалии ледовитости по данным [8] и [15].

В табл. 1 указаны годы, в которые на 60-летнем периоде зафиксированы экстремальные значения ледовитости и приведена величина аномалии, рассчитанная в долях σ для Б61, Б71, Б81 и Б91 в каждом месяце ледового сезона.

Таблица 1. Годы экстремальной ледовитости Охотского моря и ее аномалии (в долях σ) за 1961–2020 гг. по четырем базисным периодам

Table 1. Years of extreme ice cover of the Sea of Okhotsk and its anomalies (in fractions of σ) for 1961-2020 by four base periods

Месяц	Год A_{\max}	Базисный период				Год A_{\min}	Базисный период			
		Б61	Б71	Б81	Б91		Б61	Б71	Б81	Б91
XII	1998	–	1,9	2,4	2,4	1988	-1,8	-1,7	-1,6	-
I	1979	2,6	2,4	–	–	1996	–	-2,2	-2,1	-1,9
II	1978	1,8	1,9	–	–	2015	–	–	–	-1,8
III	1967	1,8	–	–	–	2015	–	–	–	-2,1
IV	1967	2,0	–	–	–	2017	–	–	–	-2,1
V	1980	2,2	2,4	–	–	2019	–	–	–	-1,3

Если проанализировать распределение A_{\max} и A_{\min} в рассматриваемые базисные периоды, можно отметить, что в Б61 во все месяцы, кроме декабря, наблюдается максимум ледовитости при аномалиях от 1,8 σ

до $2,6 \sigma$, тогда как в Б81 и Б91 A_{\max} отмечается только в декабре (аномалия $2,4 \sigma$). Во все другие месяцы значения ледовитости не достигают A_{\max} . Противоположная картина отмечается при анализе распределения A_{\min} . За период Б61 A_{\min} наблюдался только в декабре (для Б71 и Б81 еще и в январе), а в Б91 – во все месяцы сезона, кроме декабря, т. е. последнее десятилетие оказалось самым малоледовитым. При этом отрицательные аномалии по величине несколько меньше, чем положительные аномалии. В Б71 в марте и апреле значения ледовитости Охотского моря не достигли ни A_{\max} , ни A_{\min} . Характер распределения экстремальных значений по месяцам для Б71 имеет большее сходство с Б61 в области максимальных величин и с Б81 – в области минимальных значений.

Отметим еще такой факт: в течение ледового сезона только в 1967 г. встречался абсолютный максимум ледовитости последовательно в двух месяцах (март и апрель), абсолютный минимум – в 2015 г. (февраль и март). Во всех остальных случаях экстремальное значение наблюдалось по каждому месяцу в разные годы.

Обратимся к [8], где приведены годы с пятью типами зим, определенными по суровости ледовых условий в Охотском море. Критерий типизации рассчитывался по формуле, основанной на амплитуде ледовитости и количестве выделяемых типов зим [9]. Напомним, типизация осуществлялась по усредненным за весь ледовый сезон значениям ледовитости. Тем не менее годы с абсолютными значениями ледовитости для месяцев ледового сезона с января по май, представленные в табл. 1, попали в типы экстремально суровых и экстремально мягких зим. Однако в случае, когда экстремальное значение ледовитости отмечалось только в начале ледового сезона, такого совпадения не обнаружилось. Так, декабрь 1998 г. с большой ледовитостью вошел в тип мягких зим, а малоледовитый декабрь 1988 г. вошел в класс умеренных зим.

Типизация ледовитости Охотского моря на периоде 2011–2020 гг.

Оценим, как использование статистических параметров, рассчитанных для различных базисных периодов, может отразиться при типизации (классификации) явлений или процессов. Для этого была проведена классификация ледовитости Охотского моря способом, предложенным для типизации ледовых условий по характеру их сезонных (ноябрь–апрель) изменений в Баренцевом море [14]. При делении на группы в качестве критериев были приняты доли стандартного отклонения площади, занятой льдом (σ), за выбранный период. Аномалия ледовитости (anL) рассчитывалась как разность значения ледовитости и средней многолетней за месяц. Критерием крупной аномалии послужило значение $1,2 \sigma$, предложенное В.А. Спичкиным [13]. Выделено 5 групп: экстремально легкая (эл), когда $anL \leq -1,2 \sigma$; легкая (л) при $-1,2 \sigma < anL < -0,4 \sigma$; средняя (ср), когда $-0,4 \sigma \leq anL \leq 0,4 \sigma$; тяжелая (т), если $0,4 \sigma < anL < 1,2 \sigma$; экстремально тяжелая (эт), если $anL \geq 1,2 \sigma$.

По стандартным статистическим характеристикам, рассчитанным для каждого из четырех базисных периодов, используя вышеприведенные правила, получено распределение по группам ледовых условий в Охотском море для шести месяцев ледового сезона. Расчеты проводились на данных проверочной выборки за 2011–2020 гг. (всего по 60 случаям для каждого базисного периода). Количество месяцев экстремально легкой и легкой ледовитости от Б61 к Б91 уменьшается, а со средней и тяжелой ледовитостью – возрастает. Ни одного месяца с экстремально тяжелой ледовитостью за последние 10 лет не наблюдалось. Более детально рассмотрим распределение ледовых условий по группам за каждый месяц и год проверочной выборки (табл. 2).

Таблица 2. Распределение групп ледовых условий в Охотском море за период 2011–2020 гг., полученным по четырем базисным периодам

Table 2. Distribution of groups of ice conditions in the Sea of Okhotsk for the period 2011-2020, obtained for four base periods

Месяц	Период	Годы									
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
XII	Б61	л	т	л	эл	ср	л	ср	ср	л	л
	Б71	эл	т	л	эл	л	л	ср	ср	л	л
	Б81	л	т	л	эл	ср	л	ср	ср	л	л
	Б91	л	т	л	эл	ср	л	ср	ср	ср	л
I	Б61	эл	л	л	эл	эл	л	л	л	л	л
	Б71	эл	ср	ср	эл	эл	л	л	л	л	л
	Б81	эл	ср	ср	л	л	л	ср	л	л	ср
	Б91	эл	ср	ср	л	л	ср	ср	ср	ср	ср
II	Б61	эл	л	л	л	эл	л	эл	эл	л	л
	Б71	л	л	л	л	эл	л	л	эл	ср	ср
	Б81	л	ср	ср	ср	эл	ср	л	л	ср	ср
	Б91	л	ср	ср	ср	эл	ср	л	л	ср	ср
III	Б61	эл	ср	л	л	эл	л	эл	л	ср	л
	Б71	л	ср	л	л	эл	ср	эл	л	ср	л
	Б81	л	т	ср	ср	эл	ср	эл	ср	т	ср
	Б91	ср	т	ср	ср	эл	т	эл	ср	т	ср
IV	Б61	л	ср	эл	эл	эл	л	эл	л	эл	эл
	Б71	ср	ср	эл	эл	эл	л	эл	л	эл	эл
	Б81	ср	т	л	эл	эл	ср	эл	л	л	эл
	Б91	т	т	л	л	л	ср	эл	ср	л	л
V	Б61	л	ср	л	эл	л	л	эл	эл	эл	эл
	Б71	л	т	ср	эл	л	л	эл	эл	эл	эл
	Б81	ср	т	ср	эл	ср	л	эл	эл	эл	л
	Б91	ср	т	ср	эл	ср	ср	эл	л	эл	л

Разделение ледовых условий на группы с декабря по май для Б61 и Б91 в 43 случаях отличается, а в 17 – совпадает. При этом для января–мая совпадение по четырем базисным периодам одновременно происходит в случаях экстремально легкой и легкой ледовитости, а в декабре – еще и в случае средней ледовитости и тяжелой ледовитости (сезон 2011/2012 гг.). Группы, выделенные по Б71, в преобладающем большинстве (47) случаев совпадают с группами, определенными по Б61, в 36 случаях – с Б81 и в 23 случаях – Б91. Совпадение групп ледовитости, выделенных по стандартным статистическим параметрам Б81 и Б91, составляет 47 случаев. В декабре группы, выявленные по всем базисным периодам, совпадают одновременно в семи годах, а в другие месяцы – только от 1 до 3 лет (в мае).

Обратимся еще раз к типизации зим по суровости ледовых условий в Охотском море [8], осуществленной по нормам Б61. Годы 2011, 2014, 2015, входящие в рассматриваемую 10-летнюю выборку, отнесены к типу экстремально мягких зим. Усреднив за 6 месяцев ледового сезона аномалии ледовитости, выраженные в долях σ , можно с большой степенью вероятности оценить ледовые условия года. По рассчитанным таким образом величинам аномалий по Б61 упомянутые годы следует отнести к годам экстремально легкой ледовитости: аномалии $-1,2\sigma$ (2011 г.), $-1,5\sigma$ (2014 г.), $-1,7\sigma$ (2015 г.). При оценке по группам, сформированным по Б81, только в 2015 г. наблюдались экстремально легкие (средняя аномалия составила $-1,2\sigma$) ледовые условия, а в 2011 и 2014 гг. ледовые условия в Охотском море были легкими (средние аномалии $-0,7\sigma$ и $-1,0\sigma$ соответственно). По аномалиям Б91 ледовые условия для этих лет можно отнести к легким: $-0,5\sigma$ (2011 г.), $-0,8\sigma$ (2014 г.), $-1,0\sigma$ (2015 г.).

Таким образом, при интерпретации события, отнесенного к тому или иному классу, обязательно следует учитывать базисный период, на котором классификация осуществлялась.

Стоит отметить, что за последнее десятилетие с февраля по май изменился абсолютный минимум ледовитости Охотского моря. Так, абсолютный минимум ледовитости 2015 г. в феврале уменьшился на 0,4 %, а в марте – на 6,8 %. В апреле уменьшение A_{\min} произошло на 6,5 % в 2017 г., а в мае 2019 г. – на 2 %. Абсолютный максимум ледовитости, определенный за A_{60} , в этот период не наблюдался. Максимальная ледовитость за десятилетие была меньше по сравнению с A_{\max} от 10,2 % (декабрь 2011 г.) до 31,6 % (январь 2013 г.).

Оценки качества климатологических прогнозов на выборке 2011–2020 гг.

В практике прогнозирования ледовитости иногда будущие ледовые условия определяются на основании климатологических прогнозов. Качество таких прогнозов оценим на контрольной выборке 2011–2020 гг. Это период вне временных рядов, на которых рассчитаны нормы для Б61, Б71,

Б81, но включает десятилетие для Б91. Поэтому больший акцент при сравнении делаем на особенностях Б81. За прогностические принимались значения КСН, рассчитанные по каждому из базисных периодов.

По каждому году и месяцу 10-летней выборки были вычислены оценки прогнозов (δ и $P\%$). Оправдываемость определялась по величине σ , рассчитанного для каждого базисного периода. Предположим, что прогноз осуществляется с заблаговременностью более 6 месяцев. В этом случае прогноз считается оправдавшимся, если δ не превосходит σ . Значения δ и $P\%$, осредненные за ледовый сезон, приведены в табл. 3.

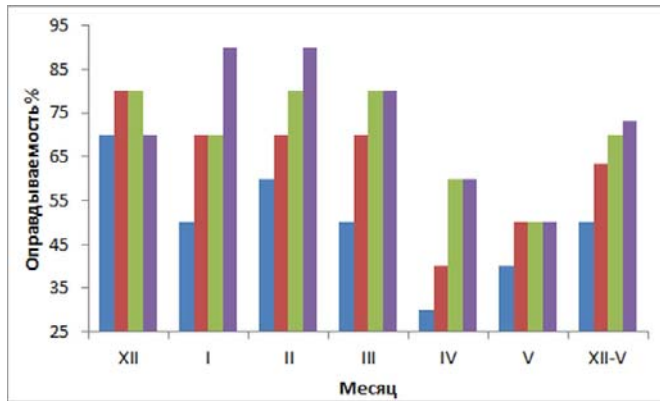
Таблица 3. Абсолютная ошибка и оправдываемость климатологических прогнозов ледовитости, осредненные за ледовый сезон, по четырем базисным периодам

Table 3. Absolute error and accuracy of climatological forecasts of ice cover, averaged over the ice season, for four base periods

Период	Годы										Среднее
	2010/ 2011	2011/ 2012	2012/ 2013	2013/ 2014	2014/ 2015	2015/ 2016	2016/ 2017	2017/ 2018	2018/ 2019	2019/ 2020	
Абсолютная ошибка											
Б61	11,9	3,5	8,3	14,7	17,7	8	17,4	11,7	8,9	11	11,3
Б71	10,5	4,2	6,9	13,3	16,2	6,6	15,6	9,6	8,2	9,5	10,1
Б81	7,5	5,5	3,3	9,4	12,4	3,6	11,9	6,2	6,2	5,7	7,2
Б91	6,1	7,8	3,3	7,4	9,9	3	10	3,9	5,6	4,9	6,2
Оправдываемость (%)											
Б61	33,3	83,3	83,3	16,7	33,3	66,7	33,3	16,7	66,7	66,7	50
Б71	33,3	100	83,3	33,3	33,3	100	33,3	66,7	66,7	66,7	61,7
Б81	66,7	100	100	33,3	33,3	100	50	66,7	83,3	66,7	70
Б91	66,7	50	100	50	66,7	100	50	83,3	83,3	83,3	73,3

Прогнозы с использованием норм Б81 по 9 годам оказались значительно успешнее прогнозов, чем по Б61, как по δ , так и по $P\%$, а также качественнее прогнозов по Б71 по величине δ . Только в ледовом сезоне 2012 г. абсолютная ошибка климатологического прогноза по нормам Б81 немногим превысила ошибки других прогнозов (при ледовитости, близкой к нормальной). Аналогичные оценки получены по Б91. При сравнении оправдываемости климатологических прогнозов по годам, отмеченной режимной особенностью не наблюдается, хотя прогнозы по Б61 в 7 годах менее успешны, чем по Б81, а в двух случаях (2015, 2020 гг.) находятся на одном уровне. Значения оправдываемости прогнозов, осуществленных по КСН Б71, в среднем за десятилетие оказались больше в сравнении с $P\%$ прогнозов по нормам Б61, но меньше, чем $P\%$ по КСН Б81 и Б91.

Оправдываемость прогнозов ледовитости, осредненная за десятилетний период по каждому месяцу ледового сезона, представлена на рис. 2 и также свидетельствует о преимуществе климатологических прогнозов по Б81 в сравнении с Б61. Наибольшая разность Р% наблюдается в марте и апреле. Оправдываемость климатологических прогнозов на периоде Б71 или меньше Б81 (с февраля по апрель), или на одном уровне (декабрь, январь и май). На периоде Б91 Р% в январе, феврале и в среднем за сезон самая высокая, только в декабре – на уровне Б61.



Б61 — синий; Б71 — красный; Б81 — зеленый; Б91 — фиолетовый

Рис. 2. Распределение средней за десятилетие оправдываемости климатологических прогнозов ледовитости в Охотском море.

Fig. 2. Distribution of the decade-long average accuracy of climatological forecasts of ice cover in the Sea of Okhotsk.

Приведенные оценки свидетельствуют о том, что КСН текущего периода дают более достоверное представление о будущей величине ледовитости, чем КСН предыдущих базисных периодов.

Результаты проведенного анализа показали разницу в режимных характеристиках ледовитости, вычисленных для четырех базисных периодов, рекомендованных ВМО. Наибольшие отличия самих характеристик и прикладного их использования (при климатологическом прогнозе и типизации ледовых условий) демонстрируют Б61 и Б81 (Б91).

Оценка качества методических прогнозов ледовитости

В оперативном режиме в ДВНИГМИ выпускаются прогнозы среднемесячной ледовитости в акваториях дальневосточных морей с заблаговременностью 7 и более месяцев по методике, утвержденной Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета [4]. В оперативном прогнозе используется базисный период Б71. Независимая выборка

начинается с 2001 г. и ежегодно увеличивается, поскольку в алгоритме разработанной модели предусмотрена адаптивная схема прогноза. При введении базисного периода Б81 начало формирования независимой выборки будет сдвинуто на 10 лет. Представлялось необходимым оценить реакцию прогностической модели на замену базисного периода. С этой целью первоначально были осуществлены и оценены ретроспективные методические и климатологические прогнозы среднемесячной ледовитости с использованием стандартных статистических параметров для Б71 и Б81 в полях гидрометеозлементов и временных рядах ледовитости на семилетнем периоде (2011/2012 – 2017/2018 гг.). Затем по ССП Б81 рассчитаны «квазиоперативные» прогнозы на два ледовых сезона (2018/2019 – 2019/2020 гг.). Оценки (оправдываемость и абсолютная ошибка) «квазиоперативных» прогнозов были сопоставлены с аналогичными оценками оперативных прогнозов средней месячной ледовитости.

Результаты оправдываемости ретроспективных методических и климатологических прогнозов среднемесячной ледовитости с использованием норм Б71 и Б81 помещены в табл. 4.

Таблица 4. Оправдываемость (Р%) ретроспективных методических и климатологических прогнозов ледовитости Охотского моря за период 2011/2012–2017/2018 гг.

Table 4. Accuracy (P %) of retrospective methodical and climatological forecasts of the Sea of Okhotsk ice cover for the period 2011/2012-2017/2018

Прогноз	Месяц						Сезон
	XII	I	II	III	IV	V	
Кл_Б81	85,7	71,4	71,4	71,4	57,1	57,1	69
Мет_Б81	100	100	100	85,7	71,4	100	92,9
Кл_Б71	85,7	71,4	71,4	71,4	42,9	57,1	66,7
Мет_Б71	85,7	100	85,7	71,4	71,4	85,7	83,3

Примечание. Мет_Б81, Мет_Б71 – методические прогнозы ледовитости;
Кл_Б81, Кл_Б71 – климатологические прогнозы ледовитости по Б81 и Б71.

Минимальная оправдываемость методических прогнозов по Б81, равная оправдываемости по Б71, отмечалась в апреле, при этом климатологический прогноз оказался хуже. Оправдываемость и методических, и климатологических прогнозов в среднем за ледовый сезон на этом периоде оказалась выше для Б81. Средняя эффективность для Б81 составила 23,9 %, а для Б71 – 16,6 %.

Оценки оперативных и «квазиоперативных» прогнозов, осредненные за два ледовых сезона, помещенные в табл. 5, также свидетельствуют об успешности прогнозов с использованием Б81. Хотя эффективность обоих прогнозов в среднем за сезон оказалась одинаковой (25 %), но абсолютная

ошибка «квазиоперативных» прогнозов во все месяцы ледового сезона была меньше.

При сравнении оправдываемости методических прогнозов при использовании Б71 и Б81 преимущество на стороне Б81. Таким образом, замена базисного периода при осуществлении методического прогноза ледовых параметров несколько улучшила его качество.

Таблица 5. Оценки (оправдываемость и абсолютная ошибка) качества методических и климатологических прогнозов ледовитости Охотского моря за сезоны 2018/2019 – 2019/2020 гг.

Table 5. Estimates (accuracy and absolute error) of the quality of methodical and climatological forecasts of the Sea of Okhotsk ice cover for the 2018/2019 – 2019/2020 seasons.

Прогноз	Месяц						Сезон
	XII	I	II	III	IV	V	
Абсолютная ошибка							
Мет_Б81	1,6	1,7	5,4	5,7	4,3	3,3	3,7
Опер_Б71	2,1	3,7	7,1	7,9	5,4	4,5	5,1
Оправдываемость							
Кл_Б81	100	100	100	100	50	0	75
Мет_Б81	100	100	100	100	100	100	100
Кл_Б71	100	100	100	100	0	0	66,7
Опер_Б71	100	100	100	50	100	100	91,7

Примечание: Мет_Б81 – «квазиоперативный», Опер_Б71 – оперативный, Кл_Б81 и Кл_Б71 – климатологические прогнозы ледовитости по Б81 и Б71.

Заключение

При изучении режима ледовитости Охотского моря в четырех 30-летних периодах с 1961 по 2020 год от января к маю (в период формирования и разрушения тяжелых льдов в Охотском море) выявлены похожие изменения климатологических стандартных норм, экстремальной ледовитости, изменчивости ледовитости. Для декабря, периода формирования устойчивого ледяного покрова, поведение аналогичных характеристик неоднозначно.

Абсолютный максимум или минимум ледовитости, зафиксированный хотя бы в одном месяце с января по май, определяет характер ледовитости всего ледового сезона для всех четырех базисных периодов.

Обновленные по текущему базисному периоду стандартные статистические параметры позволяют более реалистично представить характер аномалий ледовых условий Охотского моря.

Исследование позволило получить удовлетворительный ответ на поставленный методический вопрос: переход в расчетах к новому базисному периоду не уменьшил прогностические возможности физико-статистической модели. Осредненная за сезон оправдываемость методического и климатологического прогнозов ледовитости, осуществленных с использованием Б81, превысила оправдываемость аналогичных прогнозов по Б71 как за 7-летний период проверочной выборки, так и при сравнении «квазиоперативных» и оперативных прогнозов за два сезона (2018/2019 – 2019/2020 гг.). В целом, успешность прогноза среднемесячной ледовитости Охотского моря выросла. Результаты проведенного исследования согласуются с выводами [6] о необходимости обновления климатических данных в исследовании режима изучаемой характеристики.

Список литературы

1. Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Фоновый прогноз с большой заблаговременностью среднего месячного положения кромки льда на акваториях дальневосточных морей // ДВНИГМИ – 65 лет. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 124-143.
2. Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Прогноз с большой заблаговременностью среднемесячной ледовитости дальневосточных морей с детализацией по декадам // Труды ДВНИГМИ. 2017. №. 155. С. 141-156.
3. Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Методика прогноза ледовых параметров на акваториях дальневосточных морей большой заблаговременности // Известия ТИНРО. 2018. Т. 194. С. 239-250.
4. Анжина Г.И., Вражкин А.Н., Щербинина Т.П., Примачев Е.В. Автоматизированный метод прогноза средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей с заблаговременностью до одного года // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2013. Информационный сборник № 40. С. 80-96.
5. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата Российской Федерации: Температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 194 с.
6. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Динамические климатические нормы температуры воздуха // Метеорология и гидрология. 2012. № 12. С. 5-18.
7. Жежко Р.Я., Толмачева М.А. О способе выявления информативных предикторов // Труды ДВНИГМИ. 1990. Вып.136. С. 110-118.
8. Пицальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. // Известия ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 228-230.
9. Плотников В.В., Вакульская Н.М. Изменчивость ледовых условий Берингова моря во второй половине XX – начале XXI века // Известия ТИНРО. 2012. Т. 170. С. 220-228.
10. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 152 с.

11. РД 52.27.759-2011. Наставления по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III Служба морских гидрологических прогнозов.
12. Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм // ВМО-№ 1203. Женева, 2017. 21 с.
13. *Спичкин В.А.* Определение критерия крупной аномалии // Труды ААНИИ. 1987. Т. 402. С. 15-20.
14. *Тюряков А.Б., Мочнова Л.П.* Метод долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов в осенне-зимний период в юго-восточной части Баренцева моря с заблаговременностью 30–45 суток и технология его составления // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 3 (373). С. 73-92.
15. *Шатилина Т.А., Цицаишвили Г.Ш., Муктепавел Л.С., Никитин А.А., Радченкова Т.В.* Статистические оценки трендов климатических изменений над Дальним Востоком в зимний и летний периоды 1980–2012 гг. // Вопросы прикладной океанологии. 2014. Вып. 10. № 1. С. 76-97.
16. *Anzhina G.I., Vrazhkin A.N.* Long-term forecasting method of the ice cover in the Okhotsk sea using physical-statistical model // Pacific Oceanography. 2008. Vol. 4, no. 1-2. P. 45-49.

References

1. *Anzhina G.I., Vrazhkin A.N.* Fonovyy prognos s bolshoy zablagovremennostyu srednego mesyachnogo polojeniya kromki l'da na akvatoriyah dalnevostochnykh morey. [Background forecast with a long lead time of the average monthly position of the ice edge in the water areas of the Far Eastern seas]. Anniversary edition DVNIGMI-65. Vladivostok, Dalnauka publ., 2015, pp. 124-143 [in Russ.].
2. *Anzhina G.I., Vrazhkin A.N.* Long-term forecast of the average monthly ice cover in the far Eastern seas from detailing for every the ten-days. *FERHRI Issuer*, 2017, no. 155, pp. 124-143 [in Russ.].
3. *Anzhina G.I., Vrazhkin A.N.* Method for predicting the ice cover parameters in the waters of the Far-Eastern Seas with a long lead time. *Izvestiya TINRO*, 2018, vol. 194(3), pp. 239-250 [in Russ.]. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-194-239-250.
4. *Anzhina G.I., Vrazhkin A.N., Scherbinina T.P., Primachev E.V.* Avtomatizirovannyiy metod prognoza sredney mesyachnoy ledovitosti Ohotskogo, YApon'skogo i Beringova morey s zablagovremennostyu do odnogo goda [An automated method for forecasting the average monthly ice coverage of the Okhotsk, Japanese and Bering seas with a lead time of up to one year]. *Informatsionnyiy sbornik Gidromettsentra Rossii* [Information collection Gidromettsentra Rossii], 2013, no. 40, pp. 80-96 [in Russ.].
5. *Gruza G.V., Ran'kova E.Ya.* Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossijskoj Federacii: Temperatura vozduha. Obninsk: RIHMI-WDC publ., 2012. 194 p. [in Russ.].
6. *Gruza G.V., Ran'kova E.Ya.* Dynamic normals of surface air temperature. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, is. 11-12, pp. 717-727.
7. *Zhezhko R.Ya., Tolmacheva M.A.* O sposobe vyiavleniya informativnykh prediktorov. [On the method of identifying informative predictors]. *Trudy DVNIGMI*, 1990, vol. 136, pp. 110-118 [in Russ.].
8. *Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Minervin I.G., Batuhina A.S.* Analysis of dynamics for anomalies of the ice cover in the Okhotsk Sea in the period from 1882 to 2015. *Izvestiya TINRO*, 2016, vol. 185, no. 2, pp. 228-239 [in Russ.]. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-185-228-239.

9. Plotnikov V.V., Vakulskaya N.M. Variability of ice conditions in the Bering sea in the second half of 20 century and the beginning of 21 century. *Izvestiya TINRO*, 2012, vol. 170, pp. 220-228 [in Russ.].

10. RD 52.27.284-91. Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennykh (operativnykh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov. [Methodical instructions. Conducting production (operational) tests of new and improved methods of hydrometeorological and heliogeophysical forecasts.]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1991, 152 p. [in Russ.].

11. RD 52.27.759-2011. Nastavleniya po sluzhbe prognozov. Razdel 3. CHast' III Sluzhba morskikh prognozov. [Manual for the service of forecasts. Section 3. Part III Marine Hydrological Forecast Service.]. Moscow, Triada Ltd. publ., 2011. 195 p. [in Russ.].

12. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. *WMO-No. 1203*. In Purpose. Chairperson, Publications Board World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland, 2017, 18 p.

13. Spichkin V.A. Opredelenie kriteriya krupnoy anomalii. [Determination of the criterion for a major anomaly]. *Trudy ANII*, 1987, vol. 402, pp. 15-20 [in Russ.].

14. Tyuryakov A.B., Mochnova L.P. A method for long-range forecasting of young and first-year ice distribution in the southeastern Barents Sea in autumn-winter with a lead time of 30-45 days. *Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2019, vol. 373, no. 3, pp.73-92 [in Russ.].

15. Shatilina T.A., Tsitsiashvili G.Sh., Muktepavel L.S., Nikitin A.A., Radchenkova T.V. Statisticheskie otsenki trendov klimaticheskikh izmeneniy nad Dalnim Vostokom v zimniy i letniy periodyi 1980-2012 gg. [Statistical assessments of trends in climate change over the Far East in the winter and summer periods 1980-2012]. *Voprosyi prikladnoy okeanologii*, 2014, vol.10, no. 1, pp. 76-97 [in Russ.].

16. Anzhina G.I., Vrazhkin A.N. Long-term forecasting method of the ice cover in the Okhotsk sea using physical-statistical model. *Pacific Oceanography*, 2008, vol. 4, no. 1-2, pp. 45-49.

*Поступила 12.08.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.*

*Submitted 12.08.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.*