

УДК 551.467(268.56)

**В.В. Плотников<sup>1,2</sup>, Н.М. Вакульская<sup>1</sup>, Л.И. Мезенцева<sup>2,3</sup>,  
В.А. Дубина<sup>1</sup>, В.И. Пустошнова<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;

<sup>2</sup> Дальневосточный государственный технический  
рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б;

<sup>3</sup> Дальневосточный региональный научно-исследовательский  
гидрометеорологический институт,  
690091, г. Владивосток, ул. Фонтанная, 24

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В ЧУКОТСКОМ МОРЕ И ИХ СВЯЗЬ С АРКТИЧЕСКОЙ ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ

На основании доступной информации о состоянии ледяного покрова Чукотского моря и индексов арктической осцилляции (АО) в 1950–2017 гг. проведен анализ разномасштабной изменчивости ледовых условий и оценена зависимость ледовых условий от характера атмосферной циркуляции, отображенной в индексах арктической осцилляции. Подтверждено, что в Чукотском море в начале XXI в. идет активная интенсификация процесса уменьшения площади ледяного покрова. Отмечены изменения в характере развития ледяного покрова внутри сезона: смещение сроков начала активного разрушения льда от июня к июлю, нарастание интенсивности разрушения льда до сентября, смещение сроков начала льдообразования и полного заполнения моря льдом от сентября к октябрю и от ноября к декабрю. Выявлена зависимость типов ледовых условий Чукотского моря от типов арктической осцилляции. В теплый период при экстремально положительном типе АО достоверно отмечаются только ледовитые и экстремально ледовитые условия. Экстремально отрицательный тип АО генерирует только

---

\* Плотников Владимир Викторович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, профессор, e-mail: vlad\_plot@poi.dvo.ru; Вакульская Надежда Михайловна, научный сотрудник, e-mail: vakulskaya@poi.dvo.ru; Мезенцева Людмила Ивановна, кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: lmezenceva@ferhri.ru; Дубина Вячеслав Анатольевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, e-mail: dubina@poi.dvo.ru; Пустошнова Вера Иннокентьевна, ведущий инженер, e-mail: vpustosh@poi.dvo.ru.

Plotnikov Vladimir V., D.Geogr., professor, head of laboratory, Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern Branch of Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russia, Far-Eastern State Technical Fisheries University, 52b Lugovaya St., Vladivostok, 690087, Russia, e-mail: vlad\_plot@poi.dvo.ru; Vakulskaya Nadezhda M., researcher, Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern Branch of Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: vakulskaya@poi.dvo.ru; Mezenceva Lyudmila I., Ph.D., assistant professor, senior researcher, Far-Eastern State Technical Fisheries University, 52b Lugovaya St., Vladivostok, 690087, Russia, Far-Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, 24, Fontannaya St., Vladivostok, 690091, Russia, e-mail: lmezenceva@ferhri.ru; Dubina Vyacheslav A., Ph.D., senior researcher, Pacific Oceanological Institute Far-Eastern Branch of Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: dubina@poi.dvo.ru; Pustoshnova Vera I., leading engineer, Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern Branch of Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: vpustosh@poi.dvo.ru.

малоледовитые условия. При всех остальных типах АО распределение типов ледовых условий достаточно равномерно. Атмосферная циркуляция, отраженная в индексах АО в холодный период года (с большой заблаговременностью), практически не влияет на ледовые условия в море в июне-ноябре.

**Ключевые слова:** ледовые условия, арктическая осцилляция, типизация, тренд, влияние.

DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-155-167.

**Plotnikov V.V., Vakulskaia N.M., Mezentseva L.I., Dubina V.A., Pustoshnova V.I.** Variability of the ice conditions in the Chukchi Sea and their links with Arctic Oscillation // *Izv. TINRO.* — 2020. — Vol. 200, Iss. 1. — P. 155–167.

Variability of the ice conditions in the Chukchi Sea is considered in various scales on the basis of all available information for 1950–2017. Its dependence on the atmospheric circulation patterns measured with the Arctic Oscillation index is shown. Tendency to the ice reducing has intensified in the early 21<sup>st</sup> century in the Chukchi Sea that is accompanied with changes in its seasonal development, as shift of the ice destruction beginning from June to July, gradual increasing of the ice destruction rate till September, shift of the ice formation beginning from September to October, and delay of the ice spreading over entire sea area from November to December. Relationship of the ice conditions in the Chukchi Sea on summer phase of Arctic oscillation is detected: the maximum positive values of the index always correspond with heavy ice conditions, the minimum values of the index correspond with low-ice conditions only, and various ice conditions are observed in other years without neither positive nor negative extremities of Arctic oscillation. However, winter phase of Arctic oscillation does not affect on the ice conditions in the Chukchi Sea in June-November.

**Key words:** ice conditions, Arctic Oscillation, ice cover, trend to ice reducing, atmospheric influence.

## Введение

Обсуждаемая многими исследователями проблема изменения гидрометеорологического и ледового режимов в первую очередь отразилась на Арктическом регионе земного шара [Электронный климатический океанографический атлас..., 1998\*; Формирование и динамика..., 2004; Плотников и др., 2006; Фролов и др., 2007; Kwok et al., 2009; Катцов, Порфирьев, 2012; Плотников, Пустошнова, 2012; Алексеев и др., 2015а, б, 2018; Шалина, 2015; Думанская, 2017; Суркова, Крылов, 2018; Юлин и др., 2018].

Главным показателем этих процессов является изменение (уменьшение) площади льда в Северном полушарии. Эти изменения наиболее ярко проявились в восточном секторе Арктики, а именно в Чукотском море [Плотников и др., 2006; Kwok et al., 2009; Плотников, Пустошнова, 2012; Алексеев и др., 2015б, 2018; Думанская, 2017; Юлин и др., 2018]. Однако интерес к морям восточного сектора Арктики неизмеримо слабее, чем к западному сектору, о чем свидетельствует объем ранее упомянутых публикаций. Сведения об изменчивости ледового режима в Чукотском море и особенно оценки его связи с характером атмосферной циркуляции слабо детализированы.

Ледовые условия Чукотского моря являются одним из основных природных лимитирующих факторов эффективного развития региона, поэтому улучшение системы мониторинга ледяного покрова моря считается важнейшей научно-практической задачей. При этом характер изменчивости ледяного покрова напрямую связан с изменением циркуляционных характеристик атмосферы.

В связи с этим оценка и анализ изменчивости ледовых условий Чукотского моря, а также ее связь с характером атмосферной циркуляции представляют несомненный научный и практический интерес.

Соответственно, целью работы явились оценка и анализ изменчивости ледовых условий Чукотского моря и их связь с характером арктической осцилляции (АО).

---

\* Электронный климатический океанографический атлас Северного Ледовитого океана (зимние и летние условия на 2-х компакт-дисках). Национальный центр данных США по снегу и льду, ААНИИ. 1998.

## Материалы и методы

В качестве характеристики атмосферной циркуляции использовались индексы арктической осцилляции, заимствованные с сайта: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/ao.loading.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.loading.shtml).

Индекс АО (Arctic oscillation — арктическая осцилляция) — индекс изменения давления на уровне моря к северу от 20° с.ш., характеризующий аномалию давления в Арктике по отношению к давлению в более южных широтах северного полушария, примерно в поясе 37–45° с.ш. Арктическая осцилляция представляет собой главную моду колебаний общей циркуляции атмосферы, имеющую ярко выраженную зонально-симметричную составляющую [Thompson and Wallace, 2000; Kodera and Kuroda, 2005].

Исходной информацией о ледовых условиях послужили:

— Электронный атлас льдов арктических морей (Россия, США), включающий обобщенные месячные (осредненные за месяц) карты ледовой обстановки с 1950 по 1992 г.\*;

— Карты анализа ледовой обстановки в море в 1972–2016 гг.: с сайта [http://www.natice.noaa.gov/products/weekly\\_products.html](http://www.natice.noaa.gov/products/weekly_products.html) до 2012 г. с периодичностью 3–4 дня, а начиная с 2013 г. — с сайта <http://www.natice.noaa.gov/products/miz.html>, где выставлялись ежедневно спутниковые снимки ледовой обстановки.

Вся информация о состоянии ледяного покрова моря (положение кромки льда) осреднялась по 10-дневным периодам [Плотников, 2002, 2006; Плотников и др., 2006; Плотников, Пустошинова, 2012]. Далее декадные данные осреднялись до месячных.

На рис. 1 приведены образцы карт из разных источников.

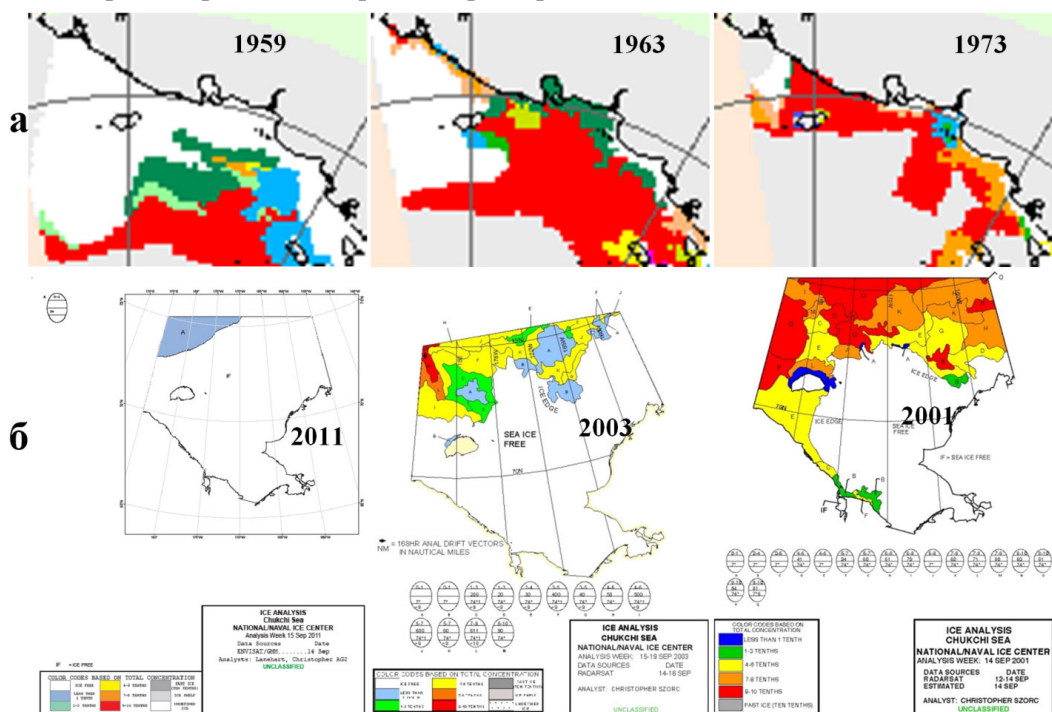


Рис. 1. Карты анализа ледовой обстановки на Чукотском море в сентябре, взятые из различных источников информации: **а** — из атласа [Электронный климатический океанографический атлас..., 1998\*]; **б** — с сайта: [http://www.natice.noaa.gov/products/weekly\\_products.html](http://www.natice.noaa.gov/products/weekly_products.html) в экстремально мало-ледовитые (1959, 2011), нормальные (1963, 2003) и экстремально ледовитые (1973, 2001) годы

Fig. 1. The ice charts for the Chukchi Sea in September of extremely low-ice years (1959, 2011), medium-ice years (1963, 2003), and years with extremely heavy ice conditions (1973, 2001): **a** — in the atlas [Электронный климатический океанографический атлас..., 1998\*]; **б** — on NOAA site: [http://www.natice.noaa.gov/products/weekly\\_products.html](http://www.natice.noaa.gov/products/weekly_products.html)

\* Электронный климатический океанографический атлас... (1998).

Положение кромки льда аппроксимировалось точками пересечения реальной кромки с меридианами, выбранными через один градус. За начало отсчета принималась параллель 76° с.ш.

Учитывая достаточно высокую точность фиксирования ледовых условий при производстве авиаразведок, а при отсутствии авиаразведок — достаточную точность привязки и дешифровки спутниковых данных, можно предположить, что возможные ошибки представления положения кромки льда, а следовательно и вычисляемых значений ледовитости, намного меньше их среднеквадратических отклонений\*.

Сравнение ледовитостей акватории, рассчитанных по различным источникам информации (спутниковые данные и данные ледовых авиаразведок) за пересекающиеся интервалы наблюдений (1972–1992 гг.), показали достаточно высокую адекватность сведений о состоянии льда в море. Коэффициенты корреляции между разными (по источникам информации) данными в целом превышали планку в 0,8 [Плотников, 2006]. Соответственно, можно предположить, что суммарная ошибка представления ледовитости составляет не более 10 %. Понятно, что имеющиеся данные достаточно разнородны, но для предварительной оценки характера ледовитости, при этом на месячном интервале осреднения, они были объединены в один архив.

Однако накопленная к настоящему времени ледовая информация отличается исходной неполнотой как в пространстве, так и во времени, что существенно затрудняет обработку и анализ. Поэтому остро встает вопрос формирования полных архивов ледовой информации, восстановленных с учетом имеющихся представлений о существующей пространственно-временной структуре ледовых характеристик. В подобном случае для решения поставленных задач наиболее рациональным подходом, по-видимому, является использование следующих процедур: расчет ЭОФ (эмпирических ортогональных функций) 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.

В настоящее время подобный подход широко применяется при формировании архивов ледовых характеристик на дальневосточных морях [Плотников, 2002].

В общем виде алгоритм задачи можно представить в виде следующей блок-схемы (рис. 2).

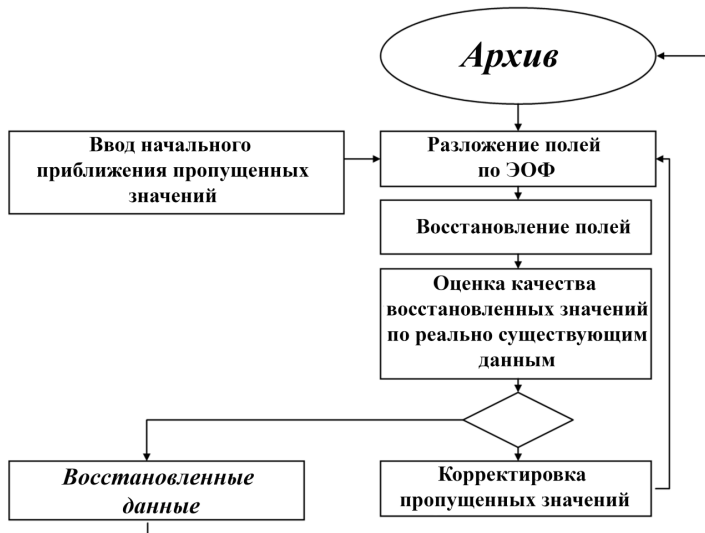


Рис. 2. Блок-схема процедур восстановления пропущенных данных  
Fig. 2. Flowchart of procedures for recovering of missing data

\* Электронный климатический океанографический атлас... (1998).

После блока «оценка качества восстановленных значений по реально существующим данным» идет логический блок, представленный на рис. 2 в виде ромба. Если качество восстановленных значений удовлетворяет заданным параметрам, то данные значения принимаются и заносятся в архив вместо пропущенных (блок — «восстановленные данные»). В противном случае переходим к блоку «корректировка пропущенных значений», и цикл повторяется. Блок «корректировка пропущенных значений» реализует оптимизационную задачу поиска пропущенных значений ( $A_s$ ) и представляет собой подбор таких пропущенных значений, которые бы минимизировали оценку критерия согласия, отражающего степень точности разложения исходных полей по ЭОФ и последующего их восстановления. В качестве начального приближения пропущенных данных использовались их средние значения. В качестве критерия согласия применялся следующий функционал:

$$\Phi_2(A_0 \dots A_s) = \max |Y_k - F_k|, 1 \leq k \leq N, \quad (1)$$

где  $Y_k, F_k$  — соответственно фактические и восстановленные значения;  $N$  — объем выборки.

Далее реализуется итерационный процесс подбора таких пропущенных значений, которые бы оптимальным образом отражали статистическую структуру анализируемого поля, представленную эмпирическими ортогональными функциями.

Формально решение сводится к определению в многомерном пространстве минимума выбранного критерия согласия (1).

Функционирование схемы происходит в следующем порядке: исходные данные, имеющие пропуски, извлекаются из ранее созданного архива.

Согласно заданным условиям (информация о характере эксперимента: длина выборок; списки пропущенных значений и их начальные приближения, точность представления полей посредством ЭОФ, выбранный критерий согласия и т.д.) отобранные поля подвергаются процедуре разложения по ЭОФ. Пропущенные значения заменяются любой их начальной оценкой (обычно средним многолетним значением).

После этого проводится восстановление исходных полей, но лишь по первым наиболее крупномасштабным собственным функциям, в сумме несущим заданное количество информации об изменчивости анализируемого элемента. Данная процедура позволяет несколько сжать информацию и исключить незначительные, близкие к случайным, флюктуации параметров. Исходные и восстановленные значения в одноименных точках поля сравниваются, и рассчитывается соответствующий функционал (критерий согласия). После этого начальные приближения пропущенных значений изменяются, и процедура повторяется до тех пор, пока не будет найден минимум выбранного функционала. При этом фиксируются оценки пропущенных данных, которые приводят к этому минимуму. Рассчитанные по этим значениям ЭОФ будут представлять оптимальную (в смысле поставленной задачи) статистическую оценку пространственно-временной структуры анализируемых полей.

Наиболее хорошая аппроксимация пропущенных значений, отражающая даже их возможные экстремальные состояния, была получена при использовании минимаксного критерия (1), что и послужило основанием для использования именно этого критерия при формировании полного архива ледовой информации для Чукотского моря [Плотников, 2006; Плотников и др., 2006; Плотников, Пустошнова, 2012].

Таким образом, были восстановлены недостающие значения в распределениях кромок льда в Чукотском море с 1950 по 2017 г. и сформирован полный (без пропусков данных) архив исходной информации.

После формирования архива кромок рассчитывалась площадь льда (площадь оконтуренной кромкой области) и оценивались значения ледовитости как отношение площади льда к общей площади моря. Общая площадь моря принималась равной 595 тыс. км<sup>2</sup> [Добровольский, Залогин, 1982].

**Результаты и их обсуждение**

**Сезонная изменчивость ледовых условий.** По распределению средних многолетних оценок (табл. 1) можно отметить наличие ярко выраженного годового хода ледовитости с минимумом в период максимального теплонакопления моря в сентябре. Максимум же изменчивости приходится на середину октября и связан с началом интенсивных осенне-зимних процессов формирования льда в море. При этом наибольший интерес представляет период с заметной изменчивостью ледовых условий, а именно июнь-ноябрь (табл. 1). В остальное время море практически полностью заполнено льдом.

Таблица 1

Основные статистические характеристики, включая оценки трендовой составляющей и вероятности ее проявления в распределениях ледовитости Чукотского моря

Table 1

Basic statistical parameters of the ice cover dynamics for the Chukchi Sea

Показатель	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь
$L_{cp}$	91,5	74,3	55,1	40,0	50,5	86,9
$\sigma_l$	7,4	9,8	16,0	21,2	24,5	18,7
$\alpha$	-0,087	-0,195	-0,340	-0,608	-0,790	-0,562
$\sigma_\alpha$	0,044	0,054	0,087	0,101	0,105	0,086
$P, \%$	$\geq 95,2$	$\geq 99,9$	$\geq 99,9$	$\geq 99,9$	$\geq 99,9$	$\geq 99,9$

*Примечание.*  $L_{cp}$  — среднее значение ледовитости;  $\sigma_l$  — среднеквадратическое отклонение;  $\alpha$  и  $\sigma_\alpha$  — параметры линейного тренда (соответственно угол наклона и среднеквадратичная погрешность оценки угла наклона);  $P$  — вероятность наличия линейного тренда.

**Межгодовая изменчивость ледовых условий.** Статистический анализ показал безусловное наличие заметных линейных трендов в многолетних распределениях ледовитости (рис. 3, табл. 1). Вероятность их существования близка к 100 %, за исключением июня, когда изменчивость ледяного покрова незначительна и трендовая составляющая менее выражена. Следовательно, можно утверждать, что в многолетней эволюции ледовых условий присутствует тенденция к уменьшению площади ледяного покрова и она существенно обострилась в начале XXI в. [Плотников и др., 2006]. Отмеченные

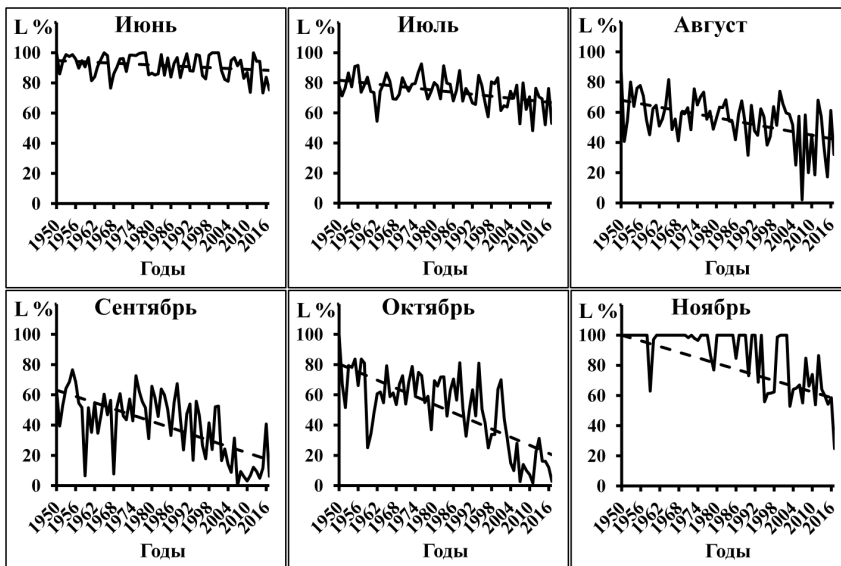


Рис. 3. Многолетние распределения ледовитости и их линейный тренд (пунктирные линии) в течение ледового периода (июнь-ноябрь) в Чукотском море

Fig. 3. Long-term dynamics of the ice cover in the Chukchi Sea in June-November and its linear trend (dashed line)

ранее [Плотников и др., 2006] изменения характера сезонных процессов: смещение сроков начала активного разрушения льда от июня к июлю, нарастание интенсивности разрушения льда до сентября и смещение сроков начала льдообразования и полного заполнения моря льдом от сентября к октябрю и от ноября к декабрю — сохранились. Все это доказывает наличие глубоких климатических изменений в ледовом режиме Чукотского моря, обострившихся за последние полтора десятка лет.

Для выявления и анализа возможных квазипериодических составляющих многолетней изменчивости ледовых процессов из исходных рядов были исключены трендовые составляющие. Затем методом максимальной энтропии вычислялись статистические оценки спектральных составляющих анализируемых рядов [Уилкс, 1967]. В арктических морях обычно выделяют 2–3-, 7–8- и 11-летние квазипериодические составляющие. Однако анализ спектров, выделенных по 68-летнему ряду ледовитости Чукотского моря (рис. 4), не позволил сделать конкретные заключения о преобладающих гармониках. Отмечается лишь доминирование 5–6-летней составляющей в начальный период разрушения льда (июнь-июль). При этом вклад высокочастотных флюктуаций, включающий чисто случайную компоненту, составляет порядка 30 %.

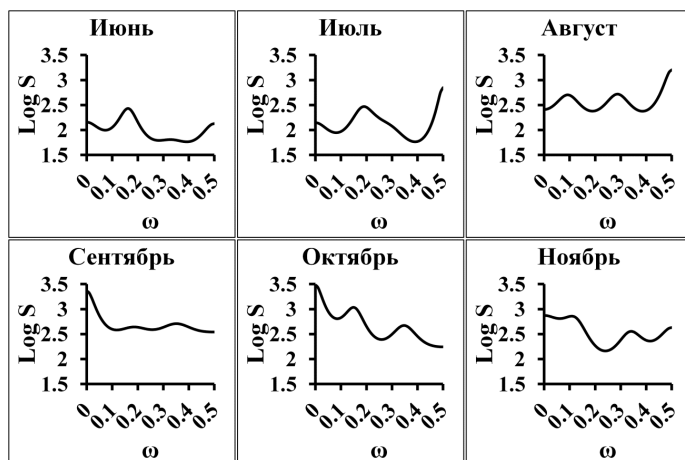


Рис. 4. Оценка частотных спектров ледовитости  $\text{Log } S(\omega)$  в течение ледового периода (июнь-ноябрь) в Чукотском море ( $\omega$  — величина, обратная периоду)

Fig. 4. Frequency spectra of the ice cover variability ( $\text{Log } S(\omega)$ ) in the Chukchi Sea in June-November

**Типизация ледовых условий моря.** Учитывая доказанное наличие трендовых составляющих в распределении ледовитости Чукотского моря, при типизации из исходных рядов они были исключены. В основу типизации был положен алгоритм равномерного разбиения рядов [Уилкс, 1967] на пять типов: экстремально малоледовитый (ЭМЛ), малоледовитый (МЛ), нормальный (Н), ледовитый (Л) и экстремально ледовитый (ЭЛ).

Типизация ледовых условий в Чукотском море была проведена для центральных декад каждого месяца с июня по ноябрь. Проверка уровня устойчивости ледовых процессов, т.е. сохранение типа ледовых условий в течение сезона, показала заметную неустойчивость ледовых процессов в море. Вероятности сохранения типа ледовых условий в течение сезона не превышают 45,1 %. Поэтому типизация ледовых условий, проведенная для каждого месяца отдельно, не может характеризовать ледовые условия в целом за весь период (июнь-ноябрь).

Для обобщенной оценки ледовых условий типизации подвергалась средневзвешенная ледовитость моря, рассчитанная по формуле

$$L_i = \frac{\sum_j L_{i,j} \sigma_j}{\sum_j \sigma_j},$$

где  $i$  — счетчик лет (от 1950 до 2017 г.);  $j$  — счетчик месяцев исследуемого периода (июнь-ноябрь);  $\sigma_j$  — среднее квадратическое отклонение ледовитости в  $j$ -й месяц.

Повторяемость различных типов ледовых условий (табл. 2) при заданных критериях классификации составила: экстремально малоледовитые годы (4 года) — 5,9 %; малоледовитые годы (11 лет) — 16,2; близкие к норме (16 лет) — 23,5; ледовитые годы (29 лет) — 42,6; экстремально ледовитые годы (8 лет) — 11,8 %.

Таблица 2

Типизация лет по характеру ледовых условий (средневзвешенной ледовитости за июнь-ноябрь), по характеру атмосферной циркуляции в теплый (июнь-ноябрь) и холодный (декабрь-май) периоды

Table 2

Types of years by ice conditions (weighted average ice cover in June–November) and types of atmospheric circulation in June–November and December–May

Типы ледовых условий				
ЭМЛ	МЛ	Н	Л	ЭЛ
1959, 2007, 2011, 2017	1951, 1952, 1960, 1968, 1979, 1990, 1997, 2005, 2009, 2010, 2015	1958, 1961–1964, 1966, 1967, 1971, 1972, 1993, 1996, 2003, 2004, 2008, 2013, 2014	1950, 1953–1957, 1965, 1969, 1970, 1974, 1977, 1978, 1980–1982, 1984–1987, 1989, 1991, 1992, 1995, 1998, 1999, 2002, 2006, 2012, 2016	1973, 1975, 1976, 1983, 1988, 1994, 2000, 2001
Типы атмосферной циркуляции в теплый период				
АО--	АО-	Н	АО+	АО++
1960, 1968	1950–1952, 1957–1959, 1962, 1965–1966, 1972, 1974, 1980–1981, 1987, 1993, 1997–1998, 2002, 2009–2010, 2012, 2014	1954–1956, 1963–1964, 1969, 1976–1977, 1979, 1982, 1984–1985, 1991–1992, 1995–1996, 2000, 2003–2005, 2007, 2011, 2015–2016	1953, 1961, 1967, 1970–1971, 1973, 1975, 1983, 1986, 1988, 1990, 1999, 2001, 2006, 2008, 2013, 2017	1978, 1989, 1994
Типы атмосферной циркуляции в холодный период				
АО--	АО-	Н	АО+	АО++
1960, 1969, 2010	1951, 1953, 1955, 1958, 1963, 1965–1967, 1970, 1977–1980, 1987, 1996, 2001, 2004, 2006	1952, 1954, 1956–1957, 1959, 1961–1962, 1964, 1968, 1971, 1974, 1981–1986, 1988, 1994–1995, 1997–1999, 2003, 2005, 2011, 2013, 2016	1972–1973, 1975–1976, 1991–1993, 2000, 2002, 2007–2009, 2012, 2014, 2017	1989–1990, 2015

*Примечание.* АО-- — экстремально отрицательный тип; АО- — отрицательный; Н — нормальный; АО+ — положительный; АО++ — экстремально положительный тип.

Как показали последующие расчеты, межгодовая преемственность обобщенного типа ледовых условий (средневзвешенной ледовитости) также оказалась достаточно низкой. Вероятность сохранения типа ледовых условий (средневзвешенной ледовитости) от года к году не превышает 44,8 %. Максимальная устойчивость отмечается для ледовитых (44,8 %) и нормальных (43,8 %) типов ледовых условий. Практически никогда (в межгодовом аспекте) не сохраняется экстремально малоледовитый тип. Максимальные вероятности отмечены для переходов в ледовитый тип как из экстремально ледовитого типа — около 75 %, так и из малоледовитого типа — около 60 % (табл. 3).

**Изменчивость характера атмосферной циркуляции, отраженной в индексах арктической осцилляции.** Аналогичным образом был также сделан расчет средневзвешенного индекса АО для теплого (июнь-ноябрь) и холодного (декабрь-май) периодов и проведена его типизация (см. табл. 2). Повторяемости типов атмосферных процессов (типов АО) при заданных критериях классификации составили для теплого и холодного периодов соответственно АО-- — 2,9 и 4,5 %; АО- — 32,4 и 26,9 %; Н — 35,3 и 41,8 %; АО+ — 25,0 и 22,4 %; АО++ — 4,4 и 4,5 %.

Межгодовая преемственность обобщенного типа атмосферных процессов, так же как и типов ледовых условий, оказалась достаточно низкой. Вероятность сохранения типа атмосферных процессов не превышает 41,7 % (нормальный тип АО) для теплого



Таблица 3

Вероятность сохранения типа ледовых условий, типа атмосферной циркуляции в теплый (июнь-ноябрь) и холодный (декабрь-май) периоды, %

Table 3

Probability of conservation for type of ice conditions and type of atmospheric circulation in June-November and December-May, %

Вероятность сохранения типа ледовых условий					
Тип	ЭМЛ	МЛ	Н	Л	ЭЛ
ЭМЛ	–	33,3	33,4	33,3	–
МЛ	10,0	20,0	10,0	60,0	–
Н	6,2	31,3	43,8	6,2	12,5
Л	6,9	10,4	24,1	44,8	13,8
ЭЛ	–	–	–	75,0	25,0
Вероятность сохранения типа атмосферной циркуляции в теплый период					
Тип	АО--	АО-	Н	АО+	АО++
АО--	–	–	50,0	50,0	–
АО-	4,6	36,4	22,7	31,8	4,5
Н	–	25,0	41,7	29,2	4,1
АО+	6,2	43,8	37,5	6,3	6,2
АО++	–	–	66,7	33,3	–
Вероятность сохранения типа атмосферной циркуляции в холодный период					
Тип	АО--	АО-	Н	АО+	АО++
АО--	–	33,3	66,7	–	–
АО-	–	27,8	61,1	11,1	–
Н	7,1	32,2	35,7	21,4	3,6
АО+	7,1	14,3	28,6	42,9	7,1
АО++	–	–	33,3	33,4	33,3

и 42,9 % (положительный тип АО) для холодного периодов. В теплый период никогда (в межгодовом аспекте) не сохраняются экстремальные (АО-- и АО++) типы циркуляции. Во все периоды максимальные вероятности (66,7 %) отмечены для переходов в нормальный тип атмосферных процессов. Однако если в теплый период они отмечены для переходов из экстремально положительного типа (АО++), то в холодный период картина прямо противоположная – переход происходит из экстремально отрицательного типа (АО--) (табл. 3).

**Оценка связи типов ледовых условий с типами атмосферной циркуляции.** Для выявления и оценки возможной связи между ледовыми условиями (типом ледовитости) и характером атмосферной циркуляции (типом АО) проведена комбинированная группировка (табл. 4).

Количественные оценки тесноты связи между типами ледовых условий и типами атмосферной циркуляции (коэффициенты взаимной сопряженности [Уилкс, 1967]) показали наличие значимых, но недостаточно хорошо выраженных связей между ними. Для теплого и холодного периодов они оказались приблизительно равными — соответственно 0,51 и 0,48. Данный факт на качественном уровне отмечался и в предшествующих исследованиях [Плотников и др., 2006].

Однако детализация всей совокупности связей между оцениваемыми параметрами показала, что при умеренной тесноте связей между типами ледовых условий и типами атмосферной циркуляции в целом можно выделить отдельные области высоких вероятностных связей между конкретными типами циркуляции и отдельными типами ледовых условий.

Так, для циркуляции в теплый период (табл. 4) при экстремально положительном типе атмосферной циркуляции достоверно отмечаются только ледовитые (66,7 %) и экстремально ледовитые состояния ледяного покрова (33,3 %). При экстремально отрицательном типе циркуляции отмечались только малоледовитые условия. При всех

Повторяемость различных типов ледовых условий в зависимости от типов атмосферной циркуляции, %

Repeatability of certain types of ice conditions in dependence on type of atmospheric circulation, %

Повторяемость в теплый период (июнь-ноябрь)					
Тип	АО--	АО-	Н	АО+	АО++
ЭМЛ	–	4,5	8,3	5,9	–
МЛ	100	22,7	12,5	5,9	–
Н	–	27,3	20,9	29,4	–
Л	–	45,5	50,0	29,4	66,7
ЭЛ	–	–	8,3	29,4	33,3
Повторяемость в холодный период (декабрь-май)					
Тип	АО--	АО-	Н	АО+	АО++
ЭМЛ	–	–	7,2	13,3	–
МЛ	66,7	11,1	14,3	6,7	66,7
Н	–	33,3	21,4	26,7	–
Л	33,3	50,0	46,4	26,7	33,3
ЭЛ	–	5,6	10,7	26,6	–

остальных типах атмосферной циркуляции распределение типов ледовых условий достаточно равномерно.

Влияние атмосферной циркуляции в холодный период года (с большой заблаговременностью), учтенное индексом АО, на ледовые условия в июне-ноябре менее определенное. По видимому, при больших временных сдвигах надо учитывать не только знак и величину индекса АО, но и пространственную локализацию типового возмущения, генерируемого этим индексом [Thompson and Wallace, 2000; Kodera and Kuroda, 2005].

Качественно механизм влияния индекса АО на ледовые условия в Чукотском море можно представить следующим образом.

При отрицательной фазе АО на фоне высокой меридиональности атмосферных процессов в тропосфере активизируется межширотный обмен, что генерирует вынос теплых воздушных масс из более низких широт в некоторые полярные области, в частности на акваторию Чукотского моря, обеспечивая мягкие ледовые условия.

При положительной фазе АО активизируется западно-восточный перенос воздуха, усиливается зональность атмосферных процессов, что способствует «запиранию» холода в полярных областях. Тепло более низких широт не поступает в полярную зону. Совокупность этих условий приводит к суровым ледовым состояниям (табл. 4).

Считается, что АО является возможным промежуточным звеном в цепочке солнечно-земных связей. Установлено, что от уровня солнечной активности зависит вертикальная структура АО [Kodera and Kuroda, 2005]. Соответственно, полученные результаты с определенной вероятностью можно интерпретировать и в плане оценки этих связей.

## Выводы

Для Чукотского моря за последние полтора десятка лет восстановлены пропущенные значения и дополнен архив ледовой информации об основных элементах ледового режима (ледовитость, положение кромки льда).

Подтверждено, что в Чукотском море в начале XXI в. идет активная интенсификация процесса уменьшения площади ледяного покрова, скорость которого увеличивается. Отмечены изменения в характере развития ледяного покрова внутри сезона: смещение сроков начала активного разрушения льда от июня к июлю, нарастание интенсивности

разрушения льда до сентября и смещение сроков начала льдообразования и полного заполнения моря льдом от сентября к октябрю и от ноября к декабрю.

Выявлена зависимость типов ледовых условий Чукотского моря от типов атмосферной циркуляции. В теплый период при экстремально положительном типе атмосферной циркуляции достоверно отмечаются только ледовитые и экстремально ледовитые условия. Экстремально отрицательный тип приводил только к малоледовитым условиям. При всех остальных типах АО распределение типов ледовых условий достаточно равномерно.

Атмосферная циркуляция, отраженная в индексах АО в холодный период года (с большой заблаговременностью), практически не влияет на ледовые условия в июне-ноябре.

Выявленные вероятностные зависимости между типом атмосферной циркуляции и ожидаемым типом ледовых условий могут быть использованы в диагностических моделях исследуемых показателей и ряде практических задач ледового обеспечения региона.

### **Благодарности**

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

### **Финансирование работы**

Работа выполнена в рамках государственного задания, № гос. регистрации: 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. Конфликта интересов нет.

### **Информация о вкладе авторов**

Концепция исследования — В.В. Плотников, Н.М. Вакульская; сбор и обработка материала — Н.М. Вакульская, Л.И. Мезенцева, В.А. Дубина, В.И. Пустошнова; статистическая обработка — Н.М. Вакульская, В.А. Дубина; анализ результатов и написание текста — В.В. Плотников; редактирование — Н.М. Вакульская.

### **Список литературы**

**Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И. и др.** Эволюция площади морского ледового покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. — 2015а. — № 2. — С. 5–19. DOI: 10.7868/S0205961415020025.

**Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И. и др.** Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2015б. — № 1(103). — С. 32–41.

**Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Смоляницкий В.М., Фильчук К.В.** Результаты и перспективы исследований климата и климатического обслуживания в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2018. — Т. 64, № 3(117). — С. 262–269. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-262-269.

**Добровольский А.Д., Залогин Б.С.** Моря СССР : учеб. — М. : МГУ, 1982. — 192 с.

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

**Катцов В.М., Порфирьев Б.Н.** Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. — 2012. — № 2(6). — С. 66–79.

**Плотников В.В.** Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2002. — 172 с.

**Плотников В.В.** Эволюция ледовых условий в Чукотском море во второй половине XX века // Морские исследования в Арктике : Тр. Арктического регионального центра. — Владивосток : Дальнаука, 2006. — Т. 4. — С. 14–23.

**Плотников В.В., Вакульская Н.М., Лукьянова Н.Б.** Об изменчивости ледовых условий Чукотского моря и ее связи с крупномасштабной циркуляцией атмосферы // Метеорол. и гидрол. — 2006. — № 12. — С. 65–74.

**Плотников В.В., Пустошинова В.И.** Изменчивость и сопряженность ледовых условий в системе морей Восточной Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) // Метеорол. и гидрол. — 2012 — № 7. — С. 54–65.

**Суркова Г.В., Крылов А.А.** Изменения средних и экстремальных скоростей ветра в Арктике в конце XXI века // Арктика и Антарктика. — 2018. — № 3. — С. 26–36. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27395.

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

**Формирование и динамика современного климата Арктики** : моногр. / под ред. Г.В. Алексеева. — СПб. : Гидрометеоздат, 2004. — 266 с.

**Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П. и др.** Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2007. — № 1(75). — С. 149–160.

**Шалина Е.В.** Изменение ледовитости северных морей России и оценка доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. — 2015. — № 4. — С. 67–78. DOI: 10.7868/S0205961415040090.

**Юлин А.В., Шаратунова М.В., Павлова Е.А., Иванов В.В.** Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2018. — Т. 64, № 3(117). — С. 229–240. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240.

**Kodera K. and Kuroda Y.** A possible mechanism of solar modulation of the spatial structure of the North Atlantic Oscillation // J. Geophys. Res. — 2005. — Vol. 110. — P. D02111. DOI: 10.1029/2004JD005258.

**Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M. et al.** Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 // J. Geophys. Res. — 2009. — Vol. 114. — P. C07005. DOI: 10.1029/2009JC005312.

**Thompson D.W.J. and Wallace J.M.** Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability // J. Clim. — 2000. — Vol. 13. — P. 1000–1016.

## References

**Alekseev, G.V., Aleksandrov, E.I., Glock, N.I., Ivanov, N.E., Smolyanitsky, V.M., Harlanenkova, N.E., and Yulin, A.V.**, The evolution of the Arctic sea ice cover in modern climate change, *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2015a, no. 2, pp. 5–19. doi 10.7868/S0205961415020025

**Alekseev, G.V., Radionov, V.F., Aleksandrov, E.I., Ivanov, N.E., and Harlanenkova, N.E.**, Climate change in the Arctic during global warming, *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2015b, no. 1(103), pp. 32–41.

**Alekseev, G.V., Radionov, V.F., Smolyanitsky, V.M., and Filchuk, K.V.**, Results and prospects of the climate studies and climate service in the Arctic, *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2018, vol. 64, no. 3(117), pp. 262–269. doi 10.30758/0555-2648-2018-64-3-262-269

**Dobrovolsky, A.D. and Zalogin, B.S.**, *Morya SSSR* (Seas of USSR), Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1982.

**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.

**Kattsov, V.M. and Porfiryev, B.N.**, Climate change in the Arctic: the consequences for the environment and the economy, *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2012, no. 2(6), pp. 66–79.

**Plotnikov, V.V.**, *Izmenchivost ledovykh usloviy dalnevostochnykh morey Rossii i ikh prognov* (Variability of ice conditions in the Russian Far Eastern seas and their prediction), Vladivostok: Dalnauka, 200.

**Plotnikov, V.V.**, The evolution of ice conditions in the Chukchi Sea in the second half XX century, *Morskie issledovaniya v Arktike: Trudy Arkticheskogo Regionalnogo Tsentra*, Vladivostok: Dalnauka, 2006, vol. 4, p. 14–23.

**Plotnikov, V.V., Vakulskaya, N.M., and Lukyanova, N.B.**, Variability of ice conditions in the Chukchi Sea and connection with large-scale atmospheric circulation, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2006, no. 12, pp. 65–74.

**Plotnikov, V.V. and Pustoshnova, V.I.**, Variability and conjugacy of ice conditions in the system of east arctic seas (the Laptev, East Siberian, and Chukchi Seas), *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 7, pp. 468–476.

**Surkova, G.V. and Krylov, A.A.**, Changes in average and extreme wind speeds in the Arctic at the end of the 21st century, *Arktika i Antarktika*, 2018, no. 3, pp. 26–36. doi 10.7256/2453-8922.2018.3.27395

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

**Formirovanie i dinamika sovremennogo klimata Arktiki** (Formation and dynamics of the modern Arctic climate), Alekseev, G.V., ed., St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2004.

**Frolov, I.E., Gudkovich, Z.M., Karklin, V.P., Kovalev, Y.G., and Smolyanitsky, V.M.**, Climatic changes of ice conditions in the Arctic seas of the Euroasian shelf, *Problemy Arktiki i Antarkтики*, 2007, no. 1(75), pp. 149–160.

**Shalina, E.V.**, Ice retreat in the seas of the Russian Arctic and increased availability of the Northern sea route from satellite passive microwave observations, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, no. 4, pp. 67–78. doi 10.7868/S0205961415040090

**Yulin, A.V., Sharatunova, M.V., Pavlova, E.A., and Ivanov, V.V.**, Seasonal and interannual changes of ice massifs in East Siberian Sea, *Problemy Arktiki i Antarkтики*, 2018, vol. 64, no. 3(117), pp. 229–240. doi 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240

**Kwok, R., Cunningham, G.F., Wensnahan, M., Rigor, I., Zwally, H.J., and Yi, D.**, Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008, *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, pp. C07005. doi 10.1029/2009JC005312

**Kodera, K. and Kuroda, Y.**, A possible mechanism of solar modulation of the spatial structure of the North Atlantic Oscillation, *J. Geophys. Res.*, 2005, vol. 110, pp. D02111. doi 10.1029/2004JD005258

**Thompson, D.W.J. and Wallace, J.M.**, Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability, *J. Clim.*, 2000, vol. 13, pp. 1000–1016.

**Elektronnyy klimaticheskyy okeanograficheskyy atlas Severnogo Ledovitogo okeana (zimniye i letniye usloviya na 2-kh kompakt-diskakh)** (Electronic climate oceanographic atlas of the Arctic Ocean (winter and summer conditions on 2 CDs)), US National Snow and Ice Data Center, AARI, 1998.

*Поступила в редакцию 16.12.2019 г.*

*После доработки 21.01.2020 г.*

*Принята к публикации 20.02.2020 г.*