

УДК 551.467.3 (268.61+268.62)

В.В. Плотников^{1,2}, О.Н. Руденко¹¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43**МОНИТОРИНГ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В СИСТЕМЕ МОРЕЙ ВОСТОЧНОГО
СЕКТОРА АРКТИКИ (ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ, ЧУКОТСКОЕ МОРЯ)
В КОНЦЕ XX НАЧАЛЕ XXI ВВ.**

На основании всей доступной информации о состоянии ледяного покрова на Восточно-Сибирском и Чукотском морях проведен анализ изменчивости основных показателей ледовых условий с конца XX (начиная с 1979 г.) к началу XXI вв. (заканчивая 2015 г.).

Проведенные исследования свидетельствуют, что в климатической системе восточной Арктики отмечаются направленные изменения климатических показателей: в ледяном покрове морей идет активное уменьшение ледяного покрова.

Полученные оценки изменчивости показателей ледовых условий свидетельствуют о глубокой перестройке климатической системы восточного сектора Арктики.

В свою очередь, в дальнейшем они могут быть использованы для реализации ряда вероятностно-статистических моделей эволюции этой системы.

Ключевые слова: *изменчивость, ледовые условия, климат, оценки, Чукотское море, Восточно-Сибирское море, Арктика.*

V.V. Plotnikov, O.N. Rudenko**MONITORING OF ICE CONDITIONS IN SYSTEM OF THE SEAS OF EAST SECTOR
OF THE ARCTIC (THE EAST SIBERIAN, CHUKCHI SEA) AT THE END OF XX
BEGINNING OF THE XXI CENTURIES**

The analysis of variability of the main indicators of ice conditions since the end of XX (since 1979) by the beginning of XXI (finishing 2015) centuries is carried out on the basis of all available information of ice cover condition an at the East Siberian and Chukchi Seas.

The conducted researches demonstrate that the directed changes of climatic indicators (there is an active reduction of an ice cover) are noted in climatic system of east Arctic.

The received estimates of variability of ice conditions indicators testify about deep reorganization of climatic system of east sector of the Arctic.

In turn, further, they can be used for realization of a number of probabilistic and statistical models of evolution of this system.

Key words: *Variability, ice conditions, climate, estimates, Chukchi Sea, East Siberian Sea, Arctic.*

Моря восточной Арктики, расположенные на северной границе азиатского материка и Северного ледовитого океана, играют заметную роль в формировании климата и погоды в Северном полушарии. Обсуждаемая многими исследователями проблема изменения климата, в первую очередь, отразилась именно на этом регионе земного шара. Соответствующие изменения затронули множество климатических факторов. Наиболее представительным показателем этих процессов является изменение объема и площади льда в Северном полушарии, в частности, площади ледяного покрова морей восточного сектора Арктики – Восточно-Сибирского и Чукотского морей.

В связи с этим оценка и анализ многолетней изменчивости комплекса отмеченных показателей, а также сопряженности циркуляционных процессов в атмосфере, ледовых и волновых процессов в системе морей восточной Арктики представляют несомненный интерес.

Целью работы явился анализ эволюции климатического показателя (площадь ледяного покрова) в системе морей восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирское, Чукотское) в конце XX начале XXI вв.

Исходные данные

В качестве исходных данных использовались сведения из отчетов о ледовых авиаразведках, отчетов капитанов ледоколов, обеспечивающих навигацию на морях восточного сектора Арктики, спутниковые данные, помещенные на сайте www.natice.noaa.gov в сети ИНТЕРНЕТ, начиная с 1979 г. Вся разноплановая информация о состоянии ледяного покрова морей восточной Арктики синтезировалась и включалась в архив исходных данных [2].

Таким образом, ряд данных о ледовых условиях составил 37 лет (1979–2015 гг.).

Объектом исследования выбрана ледовитость как наиболее наглядный, легко определяемый интегральный показатель ледового, а в более общем случае и климатического состояния акваторий.

Временной интервал исследования охватывал период с июня по ноябрь, когда изменчивость ледяного покрова максимальна. В остальное время исследуемые акватории в силу климатических особенностей практически полностью покрыты льдом. Соответственно изменчивость ледовитости в это время близка к нулю.

Результаты и их обсуждение

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

Компоновка рядов ледовитостей для оценки многолетней изменчивости проводилась следующим образом: из совокупности декадных данных извлекались значения, отстоящие друг относительно друга на период, равный одному году, рис. 1.

По ним на первом этапе проверялась гипотеза о наличии трендовой составляющей.

Для этой цели использовался линейный фильтр, выделяющий линейную функцию времени $\alpha(t)$ из смеси с белым шумом [4]. Весовая функция этого фильтра имеет вид:

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

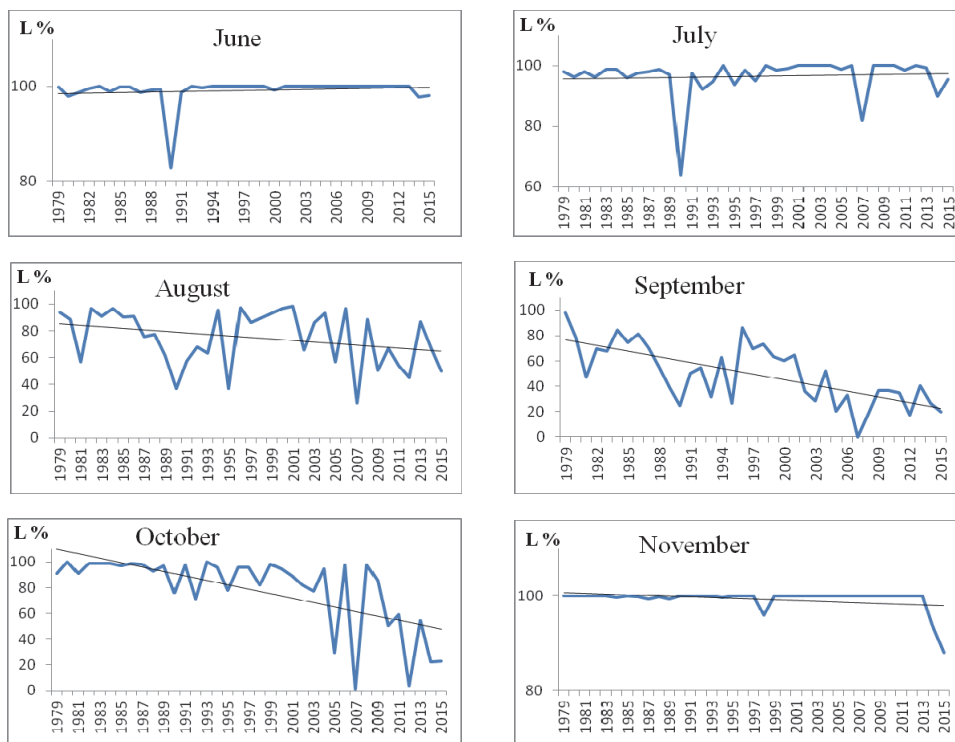
где среднеквадратичная погрешность угла наклона α есть

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

где σ_t^2 – дисперсия анализируемого временного ряда T_t после исключения тренда.

Расчетные параметры, полученные для рядов средней декадной ледовитости, приведены в табл. 1. Присутствие трендовой составляющей в многолетних распределениях ледовитости оценивалось с вероятностных позиций (последняя строка табл. 1).

Восточно-Сибирское море



Чукотское море

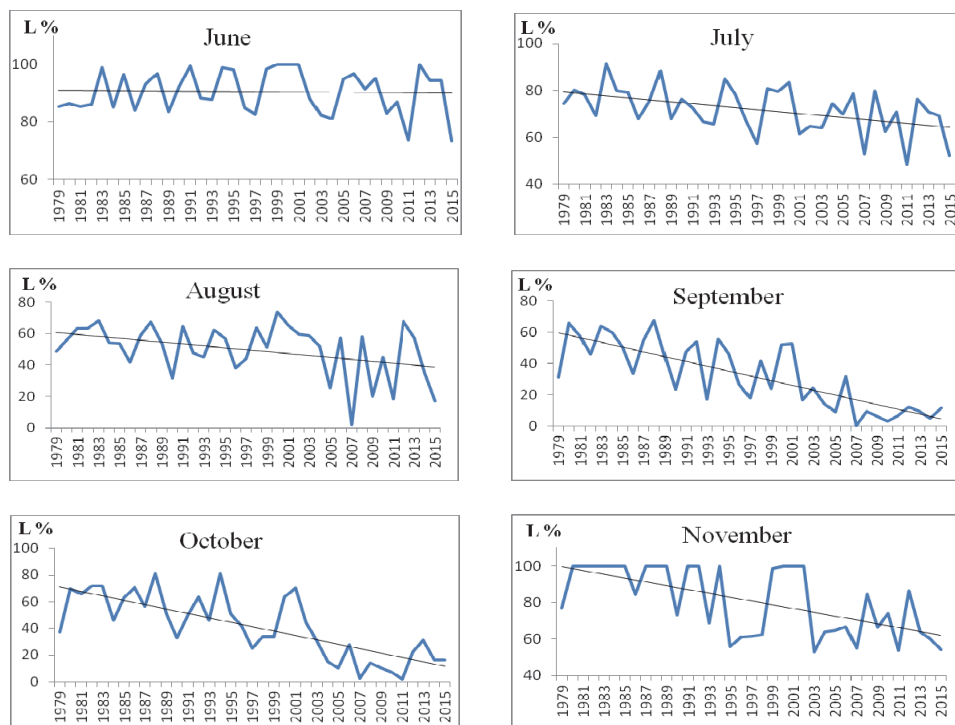


Рис. 1. Многолетние распределения ледовитостей в морях восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирском и Чукотском морях) и их линейный тренд

Fig. 1. Long-term distributions of ice covers in the seas of east sector of the Arctic (The East Siberian and Chukchi Seas) and their linear trends

Таблица 1

Оценки трендовой составляющей и вероятности ее проявления в распределениях ледовитости морей восточного сектора Арктики за период с 1979 по 2015 гг.

Table 1

Estimates of a trend component and probability of her manifestation in distributions of a le-dovitost of the seas of east sector of the Arctic from 1979 for 2015

Восточно-Сибирское море						
Оценки	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь
L_{av}	99,1	96,3	74,8	49,6	78,8	99,3
σ_t	2,8	6,7	20,7	23,7	28,5	2,3
α	0,029	0,057	-0,478	-1,204	-1,383	-0,060
σ_α	0,043	0,102	0,305	0,270	0,336	0,033
Вероятность наличия линейного тренда, %	50	42,5	88,4	99,9	99,9	93,1
Чукотское море						
Оценки	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь
L_{av}	91,7	71,3	50,2	31,4	41,3	80,5
σ_t	7,6	9,7	16,7	20,7	24,1	17,2
α	-0,101	-0,283	-0,504	-1,143	-1,311	-0,700
σ_α	0,116	0,137	0,236	0,213	0,254	0,222
Вероятность наличия линейного тренда, %	61,6	96	96,8	99,99	99,99	99,8

В таблице L_{av} – среднее значение ледовитости; σ_t^2 – дисперсия анализируемого временного ряда T_t после исключения тренда; α , σ_α – параметры линейного тренда (угол наклона и среднеквадратичная погрешность оценки угла наклона соответственно). Вероятность тренда считалась по таблицам распределения Стьюдента по значениям соотношения угла наклона $|a|$ к среднеквадратичной погрешности σ_a .

Статистический анализ представленных рядов показал существование выраженных линейных трендов в многолетних распределениях ледовых условий одновременно всей анализируемой системы морей восточной Арктики. При этом следует отметить, что существования многолетнего тренда имеет свои пространственно-временные особенности. Вероятность наличия тренда увеличивается с запада на восток (от Восточно-Сибирского моря к Чукотскому). Исходя из оценок вероятности существования тренда, выделяются обособленные интервалы в развитии ледовых условий: для Восточно-Сибирского моря – это период, следующий за периодом максимального теплонакопления (август–ноябрь); для Чукотского моря – это практически весь период летнего разрушения льда (июль–ноябрь). При этом замедление процесса разрушения льда в Восточно-Сибирском море в начальный период (незначительный положительный тренд) сопровождается ускорением этого процесса в Чукотском море. Это в свою очередь отражает некоторую противофазность ледовых процессов на западной и восточной перифериях исследуемого региона.

Вместе с тем наличие разновероятностных оценок существования тренда в течение сезона свидетельствует о направленном изменении характера внутрисезонных процессов. Это снижение интенсивности разрушения льда и развития ледяного покрова на начальном и заключи-

тельном этапе соответственно. В целом (в многолетнем плане) можно отметить некоторое смещение периода сезонной перестройки ледовых условий в сторону календарной осени.

Сравнение полученных результатов с ранее рассчитанными углами наклона линейных трендов, по данным о ледовых условиях морей до 2008 г. [3], свидетельствует об усилении деструктивных процессов в ледяном покрове морей восточного сектора Арктики и повышении активности уменьшения площади ледяного покрова, табл. 1–2.

Таблица 2

Угол наклона трендовой составляющей в распределениях ледовитости морей восточного сектора Арктики за период с 1950 по 2008 гг.

Table 2

Tilt angle of a trend component in distributions of a ledovitost the seas of east sector of the Arctic from 1950 for 2008

Восточно-Сибирское море						
Оценки	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь
α	0,032	0,005	-0,082	-0,528	-0,279	-0,005
Чукотское море						
α	-0,023	-0,139	-0,272	-0,477	-0,616	-0,422

Оценка пространственно-временной сопряженности ледовых условий в системе Восточно-Сибирского и Чукотского морей.

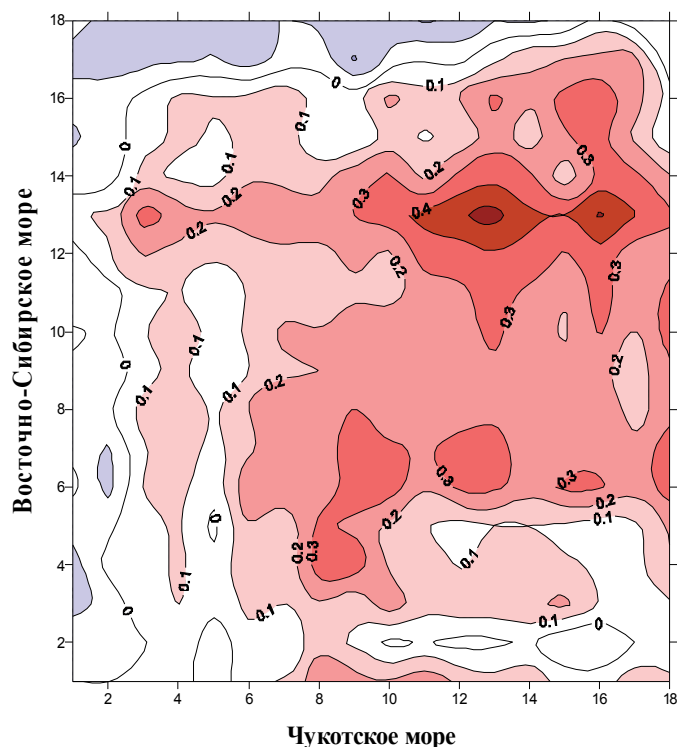


Рис. 2. Корреляционные матрицы распределений декадных ледовитостей Восточно-Сибирского и Чукотского морей
Fig. 2. Correlation matrixes of distributions of decade ice covers of the East Siberian and Chukchi Seas

Процессы эволюции ледяного покрова этих морей имеют много общих особенностей и достаточно связаны между собой. Связность определяется географической близостью этих акваторий, адекватностью циркуляционных факторов и рядом вторичных причин. Данное утверждение имеет конкретную физическую подоплеку и хорошо вписывается в общую схему макроциркуляционных особенностей восточного сектора Арктики [1].

Для оценки пространственно-временной сопряженности ледовых условий строились корреляционные матрицы связи распределений декадных ледовитостей Восточно-Сибирского – Чукотского морей, рис. 2.

Показано (рис. 2), что в целом процессы эволюции ледовых условий на акваториях Чукотского и Восточно-Сибирского морей находятся в одной фазе, т.е. при активном разрушения или развитии ледяного покрова на одном из морей следует ожидать аналогичных процессов и на другом.

Совместный анализ ледовых условий на морях выявил существование вполне конкретных областей в пространстве корреляционных отношений, характеризующихся высоким уровнем связи. Локализация этих областей меняется в зависимости от сдвига между анализируемыми величинами и от текущего момента времени. С точки зрения прогностического использования наиболее интересны связи большой заблаговременности.

В этом плане заметные связи отмечаются между ледовитостью Восточно-Сибирского моря в июле и развитием ледовых условий на Чукотском море с середины августа до середины октября (сдвиг до 2 месяцев; r (коэффициент корреляции) $\geq 0,3$), а также между сентябрьским и октябрьским состоянием ледяного покрова на данных морях соответственно (сдвиг до 1 месяца; $r \geq 0,3$). Долгосрочное влияние ледовых процессов в Чукотском море на процессы в Восточно-Сибирском море менее выражено.

Отмеченные закономерности имеют обобщенный характер. Конкретные же ситуации распределения ледовых условий в отдельные годы или даже некоторые периоды могут нарушать выявленные закономерности.

Разумеется, представление о крупномасштабной изменчивости ледовитости в связи с ограниченностью анализируемого материала еще будут уточняться. Учитывая тот факт, что обстановка с накоплением информации в ближайшее время радикально не изменится, а проводить исследования необходимо, проведенная работа может внести определенный вклад в процесс понимания функционирования такой сложной климатической системы, как Арктический бассейн.

Выводы

Проведенные исследования и полученные результаты, касающиеся изменчивости климатической системы восточного сектора Арктики, позволили сформулировать следующие основные выводы:

1. Статистический анализ распределений ледовитости показал наличие ярко выраженного отрицательного линейного тренда в многолетних изменениях ледовых условий морей восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирское и Чукотское моря). При этом следует отметить, что существование многолетнего тренда на морях имеет свои пространственно-временные особенности: вероятность наличия тренда увеличивается с запада на восток (от Восточно-Сибирского моря к Чукотскому).

2. Показано, что процессы эволюции ледяного покрова на морях восточного сектора Арктики имеют много общих особенностей и тесно связаны между собой. Связность определяется географической близостью этих акваторий, адекватностью циркуляционных факторов, а также рядом вторичных причин. Процессы эволюции ледовых условий на акваториях Чукотского и Восточно-Сибирского морей находятся в одной фазе, т.е. при активном разрушении или развитии ледяного покрова на одном из морей следует ожидать аналогичных процессов и на другом.

3. Совместный анализ ледовых процессов на морях выявил существование вполне конкретных областей в пространстве корреляционных отношений, характеризующихся высоким уровнем связи. Локализация этих областей меняется в зависимости от сдвига между анализируемыми величинами и от текущего времени года.

Проведенные исследования свидетельствуют о значительной разномасштабной изменчивости климатических характеристик Северного полушария. Индикаторами этих процессов может служить ледяной покров, атмосферная циркуляция и характер волнового перемещения. При этом все эти процессы тесно связаны между собой и в совокупности являются доминирующими в системе «атмосфера – ледяной покров – океан».

Работа частично поддержана грантом ДВО РАН 15-И-1-038 «Дальний Восток».

Список литературы

1. Гудкович, З.М. Взаимосвязь современных климатических изменений в атмосфере, океане и ледяном покрове / З.М. Гудкович, В.Ф. Захаров, Е.О. Аксенов, С.П. Позднышев // Тр. ААНИИ. – 1997. – Т. 437. – С. 7–17.
2. Плотников, В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей и их прогноз / В.В. Плотников. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 172 с.
3. Плотников, В.В. Изменчивость и сопряженность ледовых условий в системе морей Восточной Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) / В.В. Плотников, В.И. Пустошнова // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 7. – С. 54–65.
4. Привальский, В.Е. Климатическая изменчивость (стохастические модели, предсказуемость, спектры) / В.Е. Привальский. – М.: Наука, 1985. – 184 с.

Сведения об авторе: Плотников Владимир Викторович, доктор географических наук, профессор, e-mail: vlad_plot@poi.dvo.ru;

Руденко Ольга Николаевна, ассистент, e-mail: airo2@mail.ru.