

ОКЕАНОЛОГИЯ
OCEANOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>
УДК 551.326.7 (268.5)



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ИЗМЕНЕНИЕ ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА И ТОЛЩИНЫ ЗИМНЕГО
ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ
В НАЧАЛЕ XXI В.

А.Г. ЕГОРОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

ego@aari.ru

Резюме

По данным электронных карт ААНИИ за 1997–2018 гг. выполнен анализ изменчивости возрастного состава и средневзвешенной толщины ледяного покрова в арктических морях России в течение холодного периода. Установлено, что исходный ряд состоит из двух существенно различающихся частей, до и после зимы 2003/04 г. В среднем для 2004–2018 гг. (по сравнению с периодом 1997–2003 гг.) наблюдается увеличение (на 12 %) площади всех возрастных градаций льдов толщиной менее 70 см и, соответственно, уменьшение (на 18 %) площади всех возрастных градаций льдов толщиной более 70 см; наиболее радикально (примерно на порядок) уменьшилось количество двухлетних (и многолетних) льдов, а однолетние льды стали достигать реперных значений толщины позже примерно на 1–2 месяца. В соответствии с изменением структуры возрастного состава происходит уменьшение зимней средневзвешенной толщины льдов примерно на 40 см; при этом скачкообразные изменения в начале 2000-х гг. происходят не постепенно, шаг за шагом, накапливая аномалии от года к году, но — в климатическом отношении — практически мгновенно, в течение одного гидрологического года.

Ключевые слова: возрастной состав льдов, зимний период, ледяной покров арктических морей России, многолетние льды, многолетняя изменчивость ледовых условий, однолетние льды, толщина льдов, уменьшение толщины ледяного покрова

Для цитирования: Егоров А.Г. Изменение возрастного состава и толщины зимнего ледяного покрова арктических морей России в начале XXI в. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 2. С. 124–143. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>.

Поступила 13.03.2020

После переработки 16.05.2020

Принята 19.05.2020

THE RUSSIAN ARCTIC SEAS ICE AGE COMPOSITION
AND THICKNESS VARIATION IN WINTER PERIODS
AT THE BEGINNING OF THE 21ST CENTURY

ALEXANDER G. EGOROV

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

ego@aari.ru

Summary

The purpose of the paper is to analyze the large-scale peculiarities of ice age composition and thickness in winter period (October–May) along the entire stripe of the Russian Arctic seas from the Novaya Zemlya Archipelago to Alaska, as well as to assess the multi-year changes taking place in early 21st century. The source of the information used for the present paper is the electronic ice charts at the end of every month, developed in the AARI from 1997 to 2018.

On the average, during the period 1997–2018, from month to month, the consecutive and ordered changes of ice area of given age take place in accordance with the general ice thickness increase. In October–December the grey-white and first year thin ice (15–70 cm) prevails in the Arctic seas, in January–February — the first-year medium ice (70–120 cm), in March–May — the first-year thick ice (more than 120 cm).

The period from 1997 to 2018 consists of two parts (1997–2003 and 2004–2018) principally differing from one another by the peculiarities of ice age composition. The basic content of the changes in the 21st century is the decrease of relatively thicker ice area and increase of that of relatively thinner ice.

On the average, in the winter periods of 2004–2018, (1) the area of ice thinner than 70 cm (nilas, grey, grey-white and first year thin) became 12 % less than in 1997–2003, and (2) the area of ice thicker than 70 cm (first year medium, first year thick, second year and multi-year) became 18 % larger than in 1997–2003. The most significant changes regard to the second year and multi-year ice, their area in winter period decreased about 10 times. Decrease of the rate of first year ice growth is accompanied with delay of the dates when the first year ice reaches the values of 70 and 120 cm.

Correspondingly, the weighted mean ice thickness also changes. On the average, in 2004–2018 ice thickness has got about 40 cm less than in 1997–2003; by the end of cold period (May), ice thickness decrease from 153 to 117 cm.

The typical feature of the observed changes is an abrupt transformation from one climatic state of ice cover to another during only one hydrological year.

Keywords: first year ice, ice age composition, ice cover of the Russian Arctic seas, ice thickness, ice thickness decrease, multi-year ice, multi-year variability of ice conditions, winter period.

For Citation: Egorov A.G. The Russian Arctic seas ice age composition and thickness variation in winter periods at the beginning of the 21st century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 124–143. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>.

Received 13.03.2020

Revised 16.05.2020

Accepted 19.05.2020

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее характерных особенностей колебаний современного климата является кардинальная трансформация состояния природной среды прежде всего в высоких широтах Северного полушария Земли; в частности, происходит беспрецедентное сокращение площади льдов и их средней толщины [1], как зимой, так и летом [2], как в целом по Арктике, так и в отдельных арктических акваториях [3]. Дистанционные методы зондирования ледяного покрова, а также контактные измерения показывают заметное уменьшение толщины арктических льдов на акватории Арктического бассейна и окраинных арктических морей [4]. Наиболее значимым изменением возрастного состава льдов Северного Ледовитого океана в течение холодного сезона считается сокращение количества старых (двухлетних и многолетних) льдов и замещение их на однолетние льды [5]. Отмечено также, что наибольшие пространственные изменения в состоянии льдов северной полярной области происходят вдоль евразийского мелководья [6]. Однако более подробный анализ крупномасштабных особенностей зимнего изменения возрастного состава

и толщины ледяного покрова на суммарной протяженности арктических морей России от Новой Земли до Аляски, где проходят трассы Северного морского пути, пока не проводился. Целью такого анализа является количественная оценка многолетних изменений в состоянии ледяного покрова, а также ледовых условий на трассах Северного морского пути, проходящих по акватории арктических морей России.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Традиционно основной систематизированной информацией о состоянии ледяного покрова в арктических морях России являются ледовые карты, представленные на тех или иных носителях. В последние годы в структурных подразделениях ААНИИ разработана технология выделения на электронных картах однородных ледовых зон на геопривязанных спутниковых изображениях с последующим преобразованием замкнутых контуров (границ выделенных зон) в полигональные объекты в виде векторного файла [7]. В результате для зимнего сезона появляется возможность количественного расчета площади зон того или иного возраста льдов (или определенного диапазона толщин ледяного покрова). Региональные ледовые карты, составленные по отдельным арктическим морям, доступны в электронном каталоге Мирового центра данных по морскому льду [8] начиная с осени 1997 г.; карты, составленные в более ранний период, на данный момент находятся в процессе оцифровки. Архив электронных ледовых карт и их анализ с помощью ГИС-технологий позволяют регулярно оценивать количество льдов различного возраста в период формирования ледяного покрова, выявлять с месячной (или декадной) дискретностью особенности последовательного перехода возрастных градаций дрейфующих и припайных льдов от начала формирования ледяного покрова в октябре до его завершения в мае. В частности, такой анализ, включая сравнение возрастного состава дрейфующих и припайных льдов, выполнен для отдельных арктических акваторий [9, 10].

Для продолжительного холодного сезона, охватывающего в арктическом регионе осенний, зимний и весенний календарные периоды, возрастной состав ледяного покрова определяется сложным ансамблем из семи основных составных частей, который включает [11]:

- ниласовые льды толщиной 0–10 см,
- серые льды толщиной 10–15 см,
- серо-белые льды толщиной 15–30 см,
- однолетние тонкие льды толщиной 30–70 см,
- однолетние средние льды толщиной 70–120 см,
- однолетние толстые льды толщиной более 120 см,
- двухлетние и многолетние льды толщиной более 250 см.

Сочетание льдов этих 7 градаций в различной количественной пропорции формирует реальную картину пространственной неравномерности распределения толщины льдов по акватории арктических морей [12].

ВОЗРАСТНОЙ СОСТАВ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ В ТЕЧЕНИЕ ХОЛОДНОГО СЕЗОНА (ОКТАБРЬ–МАЙ) В СРЕДНЕМ ЗА ПЕРИОД 1997–2018 гг.

После момента осеннего ледообразования, по мере понижения температуры воздуха и увеличения толщины льдов, в течение холодного сезона (от октября к маю) происходит изменение соотношения площади льдов различных возрастных

градаций. В среднем для 1997–2018 гг. существуют хронологически упорядоченные особенности в соотношении площади льдов различного возраста в течение осенне-зимнего периода (табл. 1).

В октябре, в условиях только что начавшегося ледообразования, в арктических морях преобладают (29 % площади) относительно тонкие серо-белые толщиной 15–30 см, а совместная площадь серых и серо-белых льдов суммарной толщиной 10–30 см составляет около 45 % (при общей площади всех льдов около 70 %).

В ноябре на акватории начинают доминировать однолетние тонкие льды толщиной 30–70 см, площадь которых увеличивается до 39 %, а совместная площадь серо-белых и однолетних тонких льдов суммарной толщиной 15–70 см составляют около 72 % (при общей площади всех льдов около 89 %). В декабре в арктических морях продолжают преобладать однолетние тонкие льды, площадь которых относительно стабильна и составляет примерно 38 %.

В январе впервые с начала ледообразования наибольшую площадь (почти 42 %) начинают занимать однолетние льды средней толщины. В феврале наблюдается примерно схожая картина, с той лишь разницей, что площадь средних льдов несколько уменьшается (до 36 %).

В марте–мае в арктических морях отмечается достаточно стабильный возрастной состав, в котором преобладают однолетние толстые льды, их площадь постоянно увеличивается и составляет в марте 41 %, в апреле 48 %, в мае 51 %.

Общей особенностью для всех возрастных градаций является тот факт, что преобладающая за месяц возрастная градация в среднем составляет около 40 % (разброс от 29 % для серо-белых льдов в октябре до 51 % для однолетних толстых льдов в мае); в первой половине холодного сезона (октябрь–декабрь) площадь преобладающего возраста составляет в среднем 35 %, а во второй половине холодного сезона (январь–май) она увеличивается до 44 %. Другими словами, после достижения ледяным покровом толщины примерно в 1 м происходит определенная стабилизация возрастного состава ледяного покрова, т.е. увеличение вклада преобладающего возраста и соответствующее уменьшение вклада остальных (миноритарных) возрастов.

Таблица 1

Площадь (%) льдов различного возраста в холодный сезон (октябрь–май) на суммарной акватории арктических морей России в среднем за 1997–2018 гг.

Table 1

Ice relative area (%) of various ages in cold season (October–May) on the total area of the Russian Arctic seas averaged for 1997–2018

Месяц	Нилас (0–10 см)	Серые (10–15 см)	Серо-белые (15–30 см)	Тонкие (30–70 см)	Средние (70–120 см)	Толстые (120+)	2-летние
X	8,9	16,1	29,2	7,0	0,8	0,1	7,9
XI	2,8	5,7	33,4	38,6	1,9	0,3	6,7
XII	1,4	3,5	24,0	38,1	22,3	0,2	5,3
I	1,4	1,7	15,6	22,2	41,8	9,9	5,0
II	1,1	1,7	13,1	14,7	35,9	26,7	4,1
III	1,2	0,7	11,4	11,7	28,5	41,2	4,1
IV	1,8	0,3	9,4	9,2	23,8	48,3	4,0
V	0,6	0,2	8,0	7,3	20,9	50,9	4,0
Ср. (X–IV)	2,4	3,7	18,0	18,6	22,0	22,2	5,1

Осреднение месячных вкладов каждой возрастной градации за все 8 месяцев холодного периода (октябрь–май) показывает, льды какой толщины количественно доминировали на акватории арктических морей России в среднем за осенне-зимний период нарастания толщины ледяного покрова. Возрастной состав ледяного покрова четко делится на две характерные группы.

Первая группа льдов повышенной площади. Наибольшую среднесезонную площадь примерно по 20 % занимают серо-белые (площадь 18,0 %), однолетние тонкие (площадь 18,6 %), однолетние средние (площадь 22,0 %) и однолетние толстые (площадь 22,2 %) льды; эти 4 возрастные градации примерно равны по площади в сезонном осреднении и суммарно занимают в среднем более 80 % площади арктической акватории.

Вторая группа льдов пониженной площади. Вклад каждой из остальных возрастных градаций в несколько раз меньше и составляет в среднем за сезон только 2–5 %; ниласовые льды (площадь 2,4 %), серые льды (площадь 3,7 %), двухлетние льды (площадь 5,1 %) суммарно занимают только 11,2 % площади арктических морей, т.е. примерно вдвое меньше, чем любая из возрастных градаций первой группы льдов повышенной площади.

Льды первой и второй группы различаются не только среднесезонными количественными показателями, но и особенностями внутрисезонных (от месяца к месяцу) изменений.

Характерной особенностью льдов второй (миноритарной по площади) группы является достаточно простой, однонаправленный характер изменений в течение зимы, когда происходит устойчивое и последовательное уменьшение их площади в течение всего зимнего периода. Так, площадь ниласовых льдов постоянно сокращается от октября к маю и составляет в октябре около 9 %, в ноябре около 3 %, а в дальнейшем в течение декабря–мая примерно 0,5–1,5 %. Примерно те же особенности у серых льдов, площадь которых составляет в октябре около 16 %, в ноябре около 6 %, в декабре около 4 %, в январе–феврале — менее 2 %, а в марте–мае — менее 1 %. У двухлетних льдов наблюдается более плавная эволюция: их площадь медленно сокращается от 8 % в октябре, до 7 % в ноябре, примерно до 5 % в декабре–январе и примерно до 4 % в феврале–мае. В результате суммарная площадь ниласовых, серых и многолетних льдов второй группы уменьшается от 33 % в октябре до 15 % в ноябре, до 10 % в декабре, до 7–8 % в январе–феврале и до 5–6 % в марте–мае.

Напротив, характерной особенностью льдов первой (доминирующей по площади) группы является более сложный характер изменений в течение зимы, когда период увеличения площади льдов сменяется периодом их уменьшения. Для серо-белых, однолетних тонких и однолетних средних льдов наблюдается некоторый общий типовой сценарий изменения их площади в течение холодного периода.

Так, площадь серо-белых льдов является преобладающей в октябре (около 29 %), достигает сезонного максимума в ноябре (около 33 %) и затем устойчиво и постоянно уменьшается до 24 % в декабре, до 16 % в январе, до 13 % в феврале, до 11 % в марте и до 8–9 % в апреле–мае. После достижения сезонного максимума в ноябре интенсивность сокращения площади постоянно уменьшается: в декабре–январе средняя скорость уменьшения площади составляет около 8 % в месяц, а в феврале–мае — только около 2 % в месяц.

После серо-белых преобладающими становятся однолетние тонкие льды, площадь которых является преобладающей в ноябре (около 39 %) и в декабре (около 38 %), тогда же наблюдается их сезонный максимум, после чего количество льдов начинает устойчиво и постоянно уменьшаться до 22 % в январе, до 15 % в феврале, до 12 % в марте, до 9 % в апреле и до 7 % в мае. Скорость уменьшения площади составляет 8–16 % в январе–феврале и 2–3 % в марте–мае.

После доминирования однолетних тонких преобладающими становятся однолетние льды средней толщины, площадь которых является преобладающей в январе (около 42 %) и в феврале (около 36 %); в январе наблюдается их сезонный максимум, после чего количество льдов начинает устойчиво и постоянно уменьшаться до 28 % в марте, до 24 % в апреле, до 21 % в мае. Скорость уменьшения площади составляет 6–8 % в феврале–марте и 3–4 % в апреле–мае.

После однолетних льдов средней толщины доминирующими становятся однолетние толстые льды, площадь которых является преобладающей в марте (около 41 %), в апреле (около 48 %), в мае (около 51 %). Режим однолетних толстых льдов кардинально отличается от остальных возрастов группы льдов повышенной площади: в октябре–декабре толстые льды в арктических морях практически отсутствуют; в январе–марте их площадь ежемесячно увеличивается в среднем на 14 % (разброс от 9 % до 17 %). После достижения сезонного максимума количество толстых льдов уже не уменьшается, так как холодный сезон заканчивается.

Таким образом, наблюдаются различные типовые особенности внутрисезонной изменчивости льдов пониженной и льдов повышенной площади. Для возрастной группы пониженной площади характерно различное по интенсивности, но одностороннее в течение нескольких месяцев подряд уменьшение количества льдов. Суммарная площадь ниласовых, серых и двухлетних льдов в октябре составляет около 33 % и в дальнейшем достаточно быстро уменьшается до 15 % в ноябре, до 10 % в декабре, до 7–8 % в январе–феврале и до 5–6 % в марте–мае. Наибольшее уменьшение площади происходит в течение ноября–декабря, когда количество льдов сокращается от 33 % до 10 %; в январе–мае интенсивность уменьшения резко падает и составляет только 1–2 %.

Для возрастной группы повышенной площади характерно изменение количества льдов по типу ледовой волны (рис. 1). Площадь льдов определенного возраста сначала растет, затем достигает максимума и, наконец, начинает постепенно уменьшаться. Гребень, т.е. максимум площади этой волны, в октябре формируют серые льды, в ноябре и декабре — однолетние тонкие льды, в январе и феврале — однолетние средние льды, в марте–мае — однолетние толстые льды. Последовательно переходя от одного доминирующего по площади возраста к другому, чередующаяся совокупность сменяющих друг друга серых, тонких, средних, толстых льдов образует характерную сезонную стояче-поступательную волну, которая характеризует особенности сезонной эволюции возрастного состава ледяного покрова в течение всего холодного периода. Среди особенностей волновых сезонных колебаний группы повышенной площади можно выделить следующие.

Во-первых, количественной особенностью этой волны является то обстоятельство, что по мере увеличения толщины (возраста) льдов гребень волны становится все выше и выше. Наибольшее месячное значение площади льдов составляет: для серо-белых льдов около 29 %, для тонких льдов около 38 %, для средних льдов около

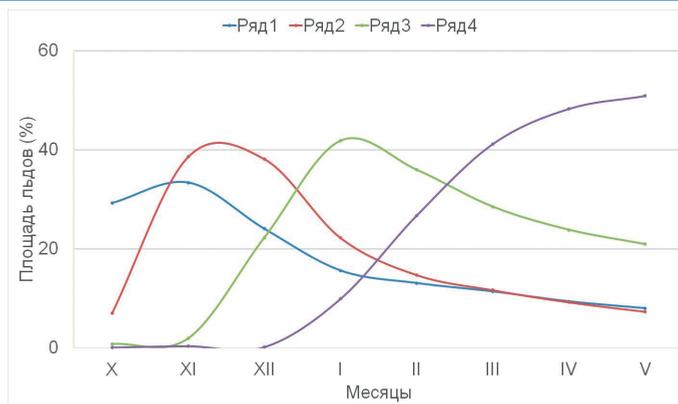


Рис. 1. Площадь (%) серо-белых (ряд 1), однолетних тонких (ряд 2), однолетних средних (ряд 3), однолетних толстых (ряд 4) льдов в течение октября–мая в среднем за 1998–2018 гг.

Fig. 1. Relative area (%) of grey-white (1), first year thin (2), first year medium (3) and first year thick (4) ice during October–May averaged for 1998–2018

42 %, для толстых льдов примерно 48–51 %; т.е. в первой половине зимы высота гребня ледовой волны соответствует примерно 1/3 площади арктических морей, а во второй половине зимы высота гребня увеличивается примерно до 1/2 площади арктических морей.

Во-вторых, восходящая ветвь ледовой волны, по мере нарастания толщины ледяного покрова, становится все более пологой. Так, для однолетних льдов увеличение их площади до рубежа примерно в 40 % происходит: у тонких льдов — за 1 месяц (от 7 % в октябре до 39 % в ноябре), у средних льдов — за 2 месяца (от 2 % в ноябре до 42 % в январе), у толстых льдов — за 3 месяца (от 0 % в декабре до 41 % в марте). То есть чем толще льды, тем медленнее происходит рост ледовой волны до наибольших за сезон величин.

В-третьих, на нисходящей ветви ледовой волны, по мере нарастания толщины ледяного покрова, уровень успокоения волнового колебания становится все более высоким. Так, после сезонного максимума площадь серо-белых и однолетних тонких льдов постепенно уменьшается до уровня примерно в 10 %, а площадь однолетних средних льдов постепенно уменьшается до уровня примерно в 20–25 %.

Представляется, что эти особенности связаны со своеобразной природой ледяного покрова, постепенностью нарастания его толщины в течение холодного периода и сезонными различиями в скорости образования льдов разных возрастов.

Эволюция колебаний ледовой волны во времени позволяет провести периодизацию холодного сезона (октябрь–май) и разделить его на три части в зависимости от преобладания волновых гребней различной высоты того или иного возраста ледяного покрова. Первый этап включает период октябрь–декабрь, когда в арктических морях преобладают серо-белые и однолетние тонкие льды суммарной толщиной 15–70 см; их площадное доминирование доходит до 72 % в ноябре и до 62 % в декабре (в среднем за октябрь–декабрь 57 %). Второй этап включает период январь–февраль, когда в арктических морях преобладают однолетние средние льды толщиной 70–120 см; их доминирование доходит до 42 % в январе (в среднем за январь–февраль около 38 %). Третий этап включает период март–май, когда в арктических морях преобладают

однолетние толстые льды толщиной более 120 см; их доминирование доходит до 51 % в мае (в среднем за март–май около 47 %). Отметим, что такая периодизация характеризует общее состояние суммарной акватории арктического мелководья и не учитывает региональные особенности отдельных локальных акваторий.

Начальный первый период (преобладания льдов толщиной 15–70 см) и завершающий третий период (преобладания льдов толщиной более 120 см) характеризуются определенным постоянством ледовых показателей, когда площадь доминирования превышает 50 %, т.е. половину суммарной площади арктических морей; оба эти периода обладают повышенной протяженностью и длятся по три месяца. Напротив, промежуточный, срединный второй период (преобладания льдов толщиной 70–120 см) характеризуется отсутствием преобладающего ледово-возрастного постоянства, когда площадь доминирования заведомо меньше 50 % и не превышает половину площади арктических морей; длительность этого периода в полтора раза короче остальных и ограничена всего двумя месяцами. Отметим, что период январь–февраль является наиболее вариативным в течение периода нарастания толщины ледяного покрова относительно возрастного состава льдов; так, в феврале отсутствует преобладание льдов какой-либо толщины: льды толщиной 0–70 см составляют 31 % площади арктических морей, льды толщиной 70–120 см — 36 %, льды толщиной более 120 см — 31 %; т.е. вклад трех основных возрастных толщин примерно одинаков.

ОСНОВНЫЕ РАЗЛИЧИЯ ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ В XX И XXI вв.

Анализ показывает, что ряд наблюдений за возрастным составом льдов в течение 1990–2010-х гг. характеризуется повышенной изменчивостью и фактически состоит из двух разных, достаточно сильно отличающихся друг от друга частей, граница между которыми проходит по началу гидрологического года 2003/04. Начиная с зимнего сезона 2003/04 г. в возрастном составе происходят однонаправленные кардинальные изменения, которых не наблюдалось в течение XX в. В каждом из месяцев холодного сезона происходят свои характерные возрастные изменения, связанные с общей месячной толщиной льдов. Основное содержание изменений состоит в том, что в возрастном составе всех зимних месяцев уменьшается площадь относительно толстых (по толщине) льдов и, соответственно, увеличивается площадь относительно тонких (по толщине) льдов. Все эти изменения носят статистически значимый характер, т.е. превышают 0,674 величины среднего квадратичного отклонения и, как следствие, сопровождаются кардинальной трансформацией режимных особенностей формирования ледяного покрова.

Так, в декабре наблюдается перераспределение площади между однолетними тонкими и однолетними средними льдами: происходит заметное увеличение количества однолетних тонких льдов и соответствующее уменьшение количества однолетних льдов средней толщины (рис. 2). В течение периода 1998–2003 гг., который демонстрирует характерное состояние ледяного покрова в конце XX в., площадь однолетних тонких льдов составляла около 19 %, а в течение периода 2003–2018 гг., который показывает характерное состояние ледовых условий в начале XXI в., площадь однолетних тонких льдов увеличилась примерно в 2,5 раза и составляла около 48 %. Напротив, одновременно в многолетнем режиме однолетних средних льдов произошли прямо противоположные изменения: в течение периода 1998–2003 гг. площадь однолетних средних льдов составляла 41 %, а в течение 2003–2018 гг.

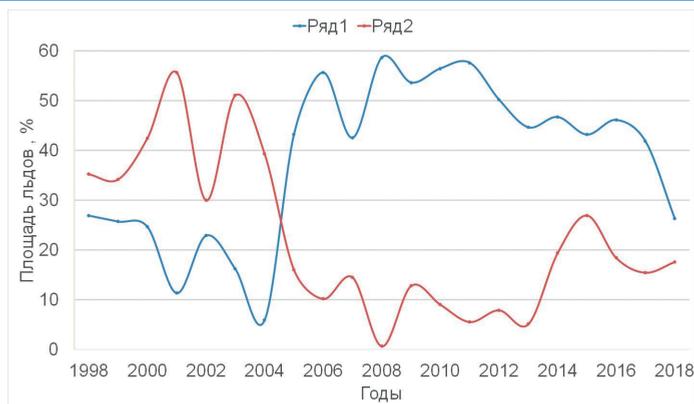


Рис. 2. Площадь (%) однолетних тонких льдов (ряд 1) и однолетних средних льдов (ряд 2) в арктических морях России в конце декабря в течение 1998–2018 гг.

Fig. 2. Relative area (%) of first year thin (1) and first year medium (2) ice in the Arctic seas in late December during 1998–2018

площадь однолетних средних льдов уменьшилась примерно в 3 раза и составляла около 13 %. То есть если в арктических морях России в декабре в XX в. относительно преобладали однолетние льды средней толщины, то в XXI в. — уже однолетние тонкие льды; от одного столетия к другому произошли зеркальные изменения в соотношении тонких и средних льдов, в результате чего ледяной покров стал тоньше.

Напротив, в январе наблюдается перераспределение площади уже между однолетними льдами средней толщины и однолетними толстыми и многолетними льдами: происходит заметное увеличение количества однолетних средних льдов и соответствующее уменьшение суммарного количества однолетних толстых и многолетних льдов (рис. 3). В течение периода 1998–2003 гг. площадь однолетних средних льдов

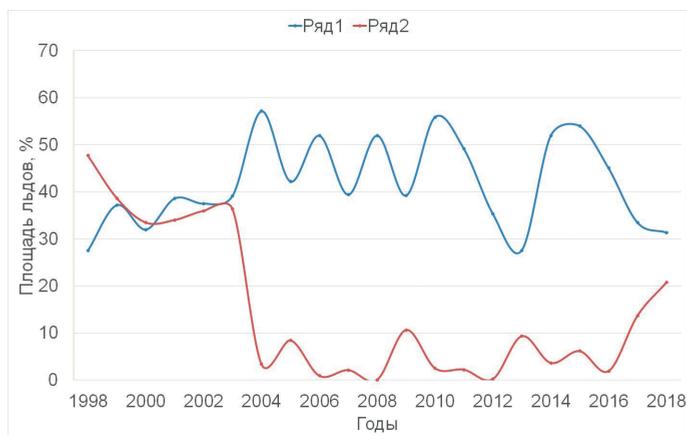


Рис. 3. Площадь (%) однолетних средних льдов (ряд 1) и однолетних толстых и многолетних льдов (ряд 2) в арктических морях России в конце января в течение 1998–2018 гг.

Fig. 3. Relative area (%) of first year medium (1) and first year thick and multi-year (2) ice in the Arctic seas in late January during 1998–2018

составляла около 35 %, а в течение периода 2003–2018 гг. площадь однолетних тонких льдов увеличилась примерно на 1/4 и составляла около 44 %. В многолетнем режиме однолетних толстых и многолетних льдов произошли прямо противоположные изменения: в течение периода 1998–2003 гг. площадь однолетних толстых и многолетних льдов составляла 38 %, а в течение 2003–2018 гг. площадь однолетних толстых и многолетних льдов уменьшилась примерно в 6 раз и составляла около 6 %. То есть если в XX в. в январе количество однолетних средних и однолетних толстых (и многолетних) льдов было примерно равным, то в XXI в. средние льды абсолютно преобладали (разница примерно в 7 раз); т.е. от одного столетия к другому происходят существенные изменения во взаимном соотношении средних и толстых (и многолетних) льдов, что соответствует общей тенденции к уменьшению толщины ледяного покрова в арктических морях России.

Для каждой возрастной градации с соответствующей толщиной льдов наблюдаются свои характерные особенности изменения возрастного состава ледяного покрова в XXI в. по сравнению с возрастным составом в XX в. (табл. 2).

Ниласовые и серые льды суммарной толщиной 0–15 см. С момента осеннего ледообразования эти льды сначала появляются, и в месяц появления (в октябре) их площадь является наибольшей в течение холодного периода, а затем количество льдов достаточно быстро уменьшается в течение оставшейся зимы, так что в январе–мае их площадь не превышает 4 %. В XXI в. (относительно XX в.) произошли следующие изменения в режиме ниласовых и серых льдов:

- во-первых, льды образуются позже примерно на две декады, в среднем соответственно в третьей декаде октября и в первой декаде октября;
- во-вторых, количество льдов в течение месяца сезонного максимума (октябрь) больше примерно в 3 раза, соответственно 30,5 % и 11,2 %;
- в-третьих, уже в ноябре площадь льдов быстро уменьшается соответственно от 30 % до 9 % и от 11 % до 8 %;

Таблица 2

Изменение площади (%) льдов различного возраста (толщины) в холодный сезон (октябрь–май) на суммарной акватории арктических морей России в среднем за период 2003–2018 гг. относительно среднего за период 1997–2003 гг.

Table 2

Change of the ice relative area (%) of various ages (thickness) on the total area of the Russian Arctic seas averaged for 2003–2018 relatively to that for 1997–2003

Месяц	Нилас+серые (0–15 см)	Серо-белые (15–30 см)	Тонкие (30–70 см)	Средние (70–120 см)	Толстые (120+)	2-летние
X	19,3	–8,8	–9,7	–0,6	–0,2	–17,8
XI	1,3	21,2	–12,7	–4,3	–1,2	–16,5
XII	3,1	8,0	23,6	–26,8	–0,5	–13,5
I	3,2	5,5	12,5	9,1	–19,8	–12,2
II	1,7	4,7	9,7	11,9	–19,0	–10,7
III	1,0	3,7	5,7	1,8	–2,8	–10,6
IV	1,2	3,1	–2,6	–4,8	12,1	–10,7
V	0,2	2,9	–3,3	–3,2	10,6	–11,5
Ср. (X–IV)	3,9	5,0	2,9	–2,1	–2,6	–12,9

– в-четвертых, во второй половине зимы площадь льдов уменьшается более плавно, так что их количество примерно вдвое больше, хотя и невелико (в декабре–апреле соответственно 2–6 % и около 1 %).

В целом наибольшие изменения в XXI в. наблюдаются в самом начале осенне-зимнего периода — в октябре (площадь больше на 19 %), а в остальные месяцы различия незначительны и составляют 1–3 %.

Серо-белые льды толщиной 15–30 см. С момента осеннего ледообразования эти льды сначала появляются, достаточно быстро их суммарная площадь увеличивается в течение 1–2 месяцев от 0 % до 35–40 %, затем достигают сезонного максимума в октябре–ноябре и, наконец, затем плавно и постепенно уменьшаются примерно в 3–4 раза (до 5–10 %) в течение 5–6 месяцев вплоть до мая. В XXI в. (относительно XX в.) произошли следующие изменения в режиме серо-белых льдов:

– во-первых, вследствие более позднего ледообразования, в октябре их площадь меньше (соответственно 26,7 % и 35,5 %);

– во-вторых, позже происходит формирование сезонного максимума их площади, соответственно в ноябре и в октябре;

– в-третьих, количество льдов в течение месяца сезонного максимума больше, соответственно 39,4 % в ноябре и 35,5 % в октябре;

– в-четвертых, во второй половине зимы площадь льдов уменьшается более плавно, так что их количество больше примерно на 3–5 % (в марте–мае соответственно 9–12 % и 6–9 %).

Наибольшие изменения в XXI в. наблюдаются в первой половине осенне-зимнего периода — в ноябре (площадь больше на 21 %), а в дальнейшем различия быстро уменьшаются и составляют в январе–мае примерно 3–5 %.

Однолетние тонкие льды толщиной 30–70 см. В течение осенне-зимнего периода площадь этих льдов сначала достаточно быстро увеличивается в течение 1–2 месяцев до величины 40–50 %, достигает сезонного максимума в ноябре–декабре и затем плавно и постепенно уменьшается до величины около 10 % в апреле–мае. В XXI в. (относительно XX в.) произошли следующие изменения в режиме однолетних тонких льдов:

– во-первых, в октябре, вследствие более позднего ледообразования, площадь тонких льдов в несколько раз меньше (соответственно 4 % и 14 %);

– во-вторых, позже происходит формирование сезонного максимума их площади, соответственно в ноябре (площадь около 48 %) и в октябре (площадь около 45 %);

– в-третьих, после месяца сезонного максимума, в течение декабря–марта, площадь льдов уменьшается более плавно, так что их количество больше на 5–25 %;

– в-четвертых, в самом конце холодного периода (апрель–май) уменьшающееся количество льдов стремится к предельному порогу около 10 %.

Наибольшие изменения в XXI в. наблюдаются в первой половине осенне-зимнего периода — в декабре (площадь больше на 24 %), а в дальнейшем различия быстро уменьшаются.

Однолетние средние льды толщиной 70–120 см. В течение зимы площадь этих льдов сначала увеличивается в течение 2–3 месяцев до величины 40–50 %, достигает сезонного максимума в декабре–январе и затем плавно уменьшается до величины около 20–25 % в апреле–мае. В XXI в. (относительно XX в.) произошли следующие изменения в режиме однолетних льдов средней толщины:

– во-первых, вследствие более позднего и медленного ледообразования, средние льды на акватории появляются только в декабре (а не в ноябре);

– во-вторых, позже происходит формирование сезонного максимума их площади, соответственно в январе и в декабре;

– в-третьих, количество льдов в течение месяца сезонного максимума больше, соответственно 44,4 % в январе и 41,4 % в декабре;

– в-четвертых, после месяца сезонного максимума, в течение второй половины зимы площадь льдов уменьшается более резко, до величины около 20 % в мае.

Наибольшие различия в XXI в. наблюдаются примерно в середине холодного периода, в феврале, когда площадь составляет соответственно 39 % и 27 %.

Однолетние толстые льды толщиной более 120 см. В течение первой половины холодного сезона (октябрь–декабрь) толстые льды в море отсутствуют и появляются только в январе, затем их площадь увеличивается в течение нескольких месяцев до 40–50 % и во второй половине зимы (с февраля–апреля), достигнув сезонного максимума, в течение нескольких месяцев почти не изменяется. В XXI в. (относительно XX в.) произошли следующие изменения в режиме однолетних толстых льдов:

– во-первых, вследствие более позднего и медленного ледообразования, количество толстых льдов в течение первого месяца их появления (в январе) существенно меньше (соответственно 4 % и 24 %);

– во-вторых, до месяца сезонного максимума в середине зимы площадь толстых льдов меньше примерно на 20 %;

– в-третьих, период однонаправленного увеличения площади толстых льдов от 0 % до 40–50 % увеличивается до 4 месяцев (январь–апрель) против 2 месяцев (январь–февраль);

– в-четвертых, позже происходит формирование устойчиво повышенной (40–50 %) площади толстых льдов во второй половине зимы (соответственно в апреле и в феврале);

– в-пятых, количественный порог преобладания толстых льдов во второй половине зимы несколько увеличивается (соответственно около 50 % и около 40 %).

Наибольшие изменения в XXI в. наблюдаются примерно в середине холодного периода, в январе и феврале.

Двухлетние (и многолетние) льды. В течение всех зимних месяцев благодаря выносному дрейфу площадь двухлетних льдов постепенно и последовательно уменьшается от октября к маю. В XXI в. (относительно XX в.) произошли следующие изменения в режиме двухлетних (и многолетних) льдов:

– во-первых, сразу после момента ледообразования, в октябре, двухлетних льдов было меньше примерно в 7,5 раз (соответственно 2,8 % и 20,6 %);

– во-вторых, в течение холодного сезона площадь двухлетних льдов уменьшилась соответственно от 3 % до 1 % и от 21 % до 12 %;

– в-третьих, наибольшее в сезоне уменьшение площади льдов происходит от октября к декабрю (соответственно от 2,8 % до 1,4 % и от 20,6 % до 14,9 %).

В целом за холодный период двухлетние льды сократились радикально, уменьшились по площади примерно в 10 раз и почти полностью исчезли как важный элемент ледового режима и составная часть возрастного состава ледяного покрова.

Сравнение среднесезонных (октябрь–май) площадей льдов различного возраста за 1997–2003 гг. и 2004–2018 гг. показывает, какие изменения в возрастном составе

произошли в течение полутора десятилетий XXI в. Наблюдаются две противоположные тенденции:

– во-первых, увеличилась площадь ниловых и серых льдов толщиной 0–15 см (в среднем на 3,9 %), серо-белых льдов толщиной 15–30 см (в среднем на 5,0 %) и однолетних тонких льдов толщиной 30–70 см (в среднем на 2,9 %); в целом площадь относительно тонких льдов толщиной менее 70 см увеличилась на 11,8 %;

– во-вторых, уменьшилась площадь однолетних средних льдов толщиной 70–120 см (в среднем на 2,1 %), однолетних толстых толщиной более 120 см (в среднем на 2,6 %) и двухлетних (и многолетних) льдов толщиной более 250 см (в среднем на 12,9 %); в целом площадь относительно толстых однолетних и двухлетних (многолетних) льдов толщиной более 70 см уменьшилась на 17,6 %.

Таким образом, в среднем для всего холодного сезона выявляется очень важная граница толщины льдов в 70 см, по разные стороны от которой происходят разнонаправленные изменения в возрастном составе ледяного покрова.

Во временном масштабе не всего холодного сезона, но отдельных месяцев различия еще больше. После 2004 г. в возрастном составе льдов арктических морей:

– во-первых, площадь серо-белых льдов стала больше на 21 % в ноябре, а однолетних тонких — больше на 24 % в декабре;

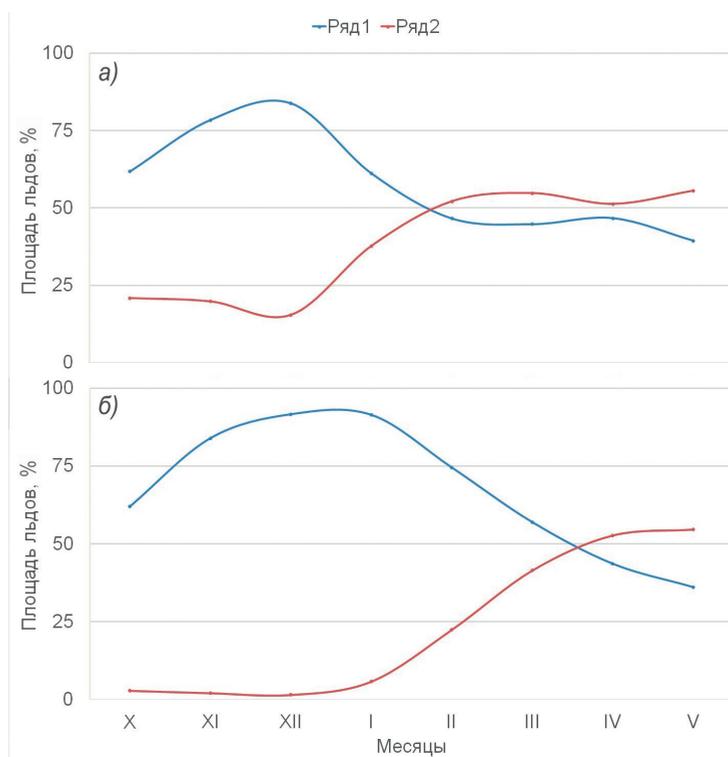


Рис. 4. Площадь (%) льдов толщиной менее 120 см (ряд 1) и более 120 см (ряд 2) в арктических морях России в среднем за 1998–2003 гг. (а) и в среднем за 2004–2018 гг. (б)

Fig. 4. Relative area (%) of ice thinner than 120 cm (1) and thicker than 120 cm (2) in the Russian Arctic seas averaged for 1998–2003 (a) and 2004–2018 (б)

- во-вторых, площадь однолетних средних льдов стала меньше на 27 % в декабре, а однолетних толстых — меньше на 20 % в январе;
- в-третьих, площадь двухлетних и многолетних льдов стала меньше на 18 % в октябре.

Если в XX в. около 62 % возрастного состава льдов суммарно приходились на однолетние средние, однолетние толстые и двухлетние льды, то в XXI в. примерно те же по количеству 62 % возрастного состава льдов суммарно приходятся на однолетние тонкие, однолетние средние и однолетние толстые льды; то есть в общей структуре преобладающих по возрасту льдов произошла замена двухлетних (и многолетних) льдов толщиной более 250 см на однолетние тонкие льды толщиной 30–70 см.

Понятно, что резкие изменения возрастного состава льдов арктических морей после 2003 г. являются составной, региональной частью более глобальных трансформаций природной среды в Арктике, которые происходят последние 20–30 лет [1]. Причины наблюдаемых изменений являются предметом научных дискуссий и требуют отдельного изучения [2, 6]. Настоящая же работа посвящена только исследованию изменений именно возрастного состава льдов в холодный период, без специального анализа атмосферных, океанических и каких-либо иных факторов, являющихся причиной наблюдаемых природных трансформаций.

ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ В НАЧАЛЕ XXI в., РАССЧИТАННЫЕ НА ОСНОВЕ ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА ЛЬДОВ

Произошедшие изменения в возрастном составе ледяного покрова делают принципиально возможной косвенную оценку уменьшения средневзвешенной толщины льдов в арктических морях России, которое наблюдается в течение последних полутора десятилетий. Если известна площадь льдов каждой из возрастных градаций, то представляется возможным рассчитать среднюю толщину некоторой условной ледяной пластины постоянной толщины, которая непрерывно покрывает всю суммарную арктическую акваторию. Для такого расчета используются два допущения.

Во-первых, толщина начальных и молодых льдов заменяется на среднее значение для диапазона толщин данной градации, то есть принимается, что толщина ниласовых льдов (0–10 см) составляет 5 см, толщина серых льдов (10–15 см) составляет 12,5 см, толщина серо-белых льдов (15–30 см) составляет 22,5 см.

Во-вторых, для однолетних и многолетних льдов расчет отличается; сначала происходит замена толщины на среднее значение для диапазона (толщина однолетних тонких льдов (30–70 см) составляет 50 см, толщина средних льдов (70–120 см) составляет 95 см, толщина толстых льдов (от 120 см до примерно около 200 см) составляет 160 см, толщина двухлетних льдов (2–3 м) составляет около 250 см), а затем вводится поправка на постепенность увеличения толщины льдов в течение холодного сезона; так, для однолетних тонких льдов (30–70 см) принимается, что в начале осени их толщина была ближе к 30–40 см, а в конце зимы толщина ближе к диапазону 60–70 см; для однолетних толстых льдов (более 120 см) принимается, что в середине зимы их толщина была ближе к 120–130 см, а в конце зимы толщина ближе к диапазону 190–200 см и т.д.

С учетом этих допущений был произведен расчет средневзвешенной толщины ледяного покрова в конце каждого месяца холодного сезона для всего имеющегося

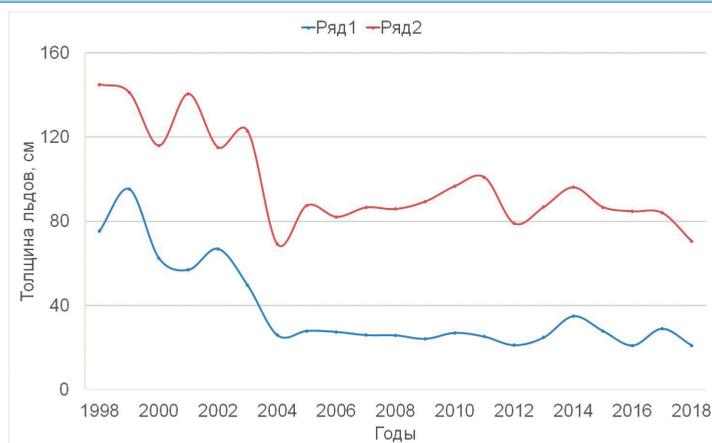


Рис. 5. Средневзвешенная по возрастному составу толщина (см) льдов в арктических морях России в конце ноября (ряд 1) и в конце февраля (ряд 2) в течение 1998–2018 гг.

Fig. 5. Weighted-average ice thickness (cm) in the Russian Arctic seas in late November (1) and late February (2) during 1998–2018

ряда наблюдений. Как видно на примере ноября и февраля (рис. 5), зима 2003/04 г. является важным рубежом в отношении не только возрастного состава ледяного покрова, но и средневзвешенной толщины льдов. Начиная с 2004 г. наблюдается существенное уменьшение толщины льдов в арктических морях в каждом из месяцев холодного сезона. Осреднение значений толщины льдов для двух периодов, до и после 2004 г., позволяет установить основные особенности изменения толщины ледяного покрова в XXI в. (рис. 6).

Во-первых, уже в октябре, сразу после начала устойчивого ледообразования, толщина льдов в XXI в. становится примерно на 40 см меньше, чем в XX в.; это

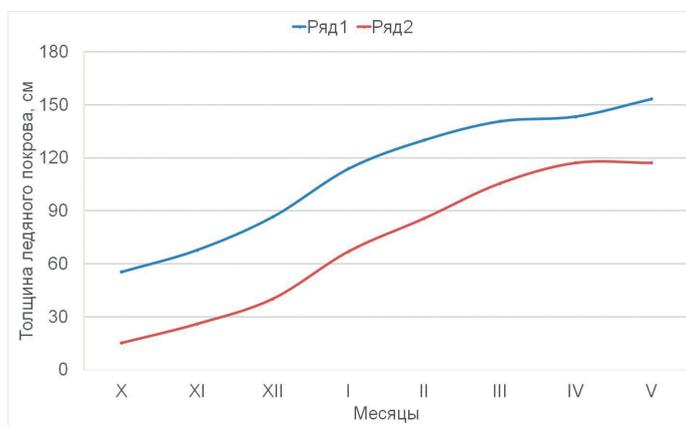


Рис. 6. Средневзвешенная по возрастному составу толщина (см) льдов в арктических морях России в октябре–мае в среднем за 1998–2003 гг. (ряд 1) и 2004–2018 гг. (ряд 2)

Fig. 6. Weighted-average ice thickness (cm) in the Russian Arctic seas in October–May averaged for 1998–2003 (1) and 2004–2018 (2)

связано с резким уменьшением количества остаточных льдов, почти полным исчезновением в возрастном составе двухлетних (и многолетних) льдов.

Во-вторых, в течение 7–8 месяцев холодного сезона наблюдается примерно одинаковая интенсивность нарастания толщины ледяного покрова в XX и XXI вв.; от октября до мая толщина льдов увеличилась: в течение 1998–2003 гг. в среднем примерно на 98 см, а в течение 2004–2018 гг. — в среднем примерно на 102 см. В среднем для двух сценариев (XX и XXI вв.) наиболее активное приращение толщины средневзвешенных льдов наблюдается от декабря к январю — около 27 см за месяц; в ноябре–декабре скорость прироста составляет около 14 см, в феврале–марте — около 16 см, в апреле–мае — около 6 см в месяц.

В-третьих, достижение средневзвешенным льдом одних и тех же реперных возрастных градаций в XXI в. происходит примерно на 2 месяца позже, чем в XX в.; так, нарастание до преобладания тонких льдов в течение 1998–2003 гг. происходит в октябре, а в 2004–2018 гг. — только в декабре; нарастание до преобладания однолетних средних льдов в течение 1998–2003 гг. происходит в декабре, а в 2004–2018 гг. — только в феврале.

В-четвертых, режим нарастания толщины до преобладания однолетних толстых льдов является наиболее характерным отличием XXI в.; в 1998–2003 гг. толщина ледяного покрова достигает стадии толстых льдов в феврале, а в 2004–2018 гг. такого достижения не происходит до самого окончания холодного сезона в мае.

В результате на завершающей стадии зимнего периода (в апреле–мае) толщина льдов в 1998–2003 гг. увеличивается примерно до и несколько более 1,5 м, а в 2004–2018 гг. — не достигает и 1,2 м. В среднем для всего холодного сезона (октябрь–май) средневзвешенная толщина ледяного покрова в XXI в. уменьшается примерно на 40 см, т.е. становится меньше примерно на 1/3 по сравнению с XX в., а наибольшие аномалии (до 45–47 см) наблюдаются в срединной части холодного периода, т.е. в течение декабря–февраля.

Оценки изменений, полученные в настоящей статье, хоть и носят косвенный характер, в целом примерно совпадают с данными непосредственных контактных и дистанционных измерений толщины ледяного покрова в Арктике и арктических морях. Так, согласно работе [4] толщина многолетнего льда в Арктике осенью/зимой сократилась в начале XXI в. среднем примерно на 60 см, а толщина однолетнего льда осталась в среднем неизменной; при этом, по мнению [5], наиболее значительное уменьшение толщины льда произошло в Центральной и Восточной Арктике. Средняя толщина в целом по Арктике после лета 2007 г. была на 26 см меньше, чем за предшествующий 5-летний период, а в Восточной Арктике (Северное Чукотское плато, море Бофорта) — меньше на 49 см [13]. На разрезе от моря Лаптевых к Северному полюсу средняя толщина льда в августе уменьшилась на 44 см (от 1977 г. к 2005 г.) вследствие значительного уменьшения протяженности пути в старых льдах [14]. По мнению [6], в XXI в. изменение толщины однолетних льдов составило около 26 % относительно базового периода XX в. Площадь льдов старше пяти лет уменьшилась с 16 % в середине 1980-х гг. до 1,2 % в 2016 г. [15].

Также подтверждается и хронологическая локализация временного периода наиболее резких природных изменений. По мнению [5], наибольшая скорость уменьшения средней толщины льда была зафиксирована в период 2003–2008 гг., а по [6] наибольшее уменьшение толщины льдов произошло к 2007 г. Также 2007 г. рассма-

тривается как момент резких изменений относительно предшествующего 5-летнего периода [13]. На трассах Северного морского пути именно в 2003–2007 гг. произошло значимое изменение ледовых условий по маршрутам плаваний [16].

Отметим также, что после 2008 г. интенсивность уменьшения толщины льдов в Арктике существенно (в разы) падает, более того, трансформации, происходящие с многолетним льдом в последние годы, по-разному и противоречиво описываются в различных исследовательских работах [15]; в частности, констатируется, что, например, зимой 2014 г. наблюдалась смена природных тенденций, средняя толщина многолетнего льда в Арктике стала увеличиваться и превысила 4 м, а у берегов Канады — даже и 5 м [17]. В целом в течение 2010-х гг. наблюдается увеличение степени неопределенности в исследовательских оценках происходящих изменений; например, разница оценок в определении площади многолетних арктических льдов у разных авторов и алгоритмов достигает 1 млн км² [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По данным электронных карт ААНИИ выполнен анализ особенностей возрастного состава ледяного покрова арктических морей России в течение 1997–2018 гг. В среднем за холодный сезон (октябрь–май) наибольшую площадь занимают: серо-белые (18,0 %), однолетние тонкие (18,6 %), однолетние средние (22,0 %) и однолетние толстые (22,2 %) льды, которые в совокупности занимают более 80 % площади арктических морей.

2. В течение холодного сезона происходит последовательное (от месяца к месяцу) и упорядоченное изменение площади льдов того или иного возраста, в соответствии с общим нарастанием толщины ледяного покрова. В октябре–декабре в арктических морях преобладают серо-белые и однолетние тонкие льды суммарной толщиной 15–70 см, площадь которых составляет до 72 % в ноябре; в январе–феврале преобладают однолетние средние льды толщиной 70–120 см, площадь которых доходит до 42 % в январе; в марте–мае — однолетние толстые льды толщиной более 120 см, площадь которых доходит до 51 % в мае.

3. Ряд наблюдений 1997–2018 гг. состоит из двух принципиально различающихся частей: до и после зимы 2003/04 г. Начиная с зимнего сезона 2003/04 г. в возрастном составе происходят резкие кардинальные изменения, которых не наблюдалось ранее, до начала XXI в. Основное содержание изменений состоит в том, что в возрастном составе всех зимних месяцев уменьшается площадь относительно толстых (по толщине) льдов и, соответственно, увеличивается площадь относительно тонких (по толщине) льдов.

4. В среднем для холодного периода 2004–2018 гг. (по сравнению с периодом 1997–2003 гг.): во-первых, увеличилась (в среднем на 12 %) площадь ниласовых, серых, серо-белых и однолетних тонких льдов общей толщиной менее 70 см, и, во-вторых, уменьшилась (в среднем на 18 %) площадь однолетних средних, однолетних толстых и двухлетних (и многолетних) льдов общей толщиной более 70 см. В результате в среднем для всего холодного сезона выявляется очень важная граница толщины льдов в 70 см, по разные стороны от которой происходят разнонаправленные изменения в возрастном составе ледяного покрова.

5. В XXI в. наиболее значимые изменения происходят с двухлетними и многолетними льдами, площадь которых в целом за холодный период сократилась радикально, примерно в 10 раз, так что эти льды почти полностью исчезли как важный

элемент ледового режима и составная часть возрастного состава ледяного покрова. Однолетние льды стали образовываться примерно на месяц позже, интенсивность их нарастания уменьшилась, так что наблюдается сдвиг на 1–2 месяца сроков достижения реперных отметок толщины льдов (таких, как 70 и 120 см).

6. В общей структуре преобладающих по возрасту льдов произошла замена двухлетних (и многолетних) льдов толщиной более 250 см на однолетние тонкие льды толщиной 30–70 см.

7. В соответствии с эволюцией возрастного состава происходят многолетние изменения средневзвешенной для пространства всех арктических морей России толщины льдов. Для периода 2004–2018 гг. в среднем за холодный период (октябрь–май) наблюдается уменьшение (по сравнению с периодом 1997–2003 гг.) средневзвешенной по возрастному составу толщины ледяного покрова примерно на 40 см. Если для периода 1997–2003 гг. к концу холодного периода (апрель–май) рассчитанная толщина льдов составляла около и более 1,5 м, то для периода 2004–2018 гг. она не превышает 1,2 м.

8. Резкие, скачкообразные изменения в возрастном составе и средневзвешенной толщине льдов происходят в течение одного холодного сезона 2003/04 г., который разделяет два принципиально различающихся многолетних периода, характеризующих состояние льдов в конце XX и начале XXI в.; при этом многолетние изменения происходят не постепенно, шаг за шагом, накапливая аномалии от года к году, но — в климатическом отношении — практически мгновенно, в течение одного гидрологического года.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена в рамках ЦНТП Росгидромета, тема 5.1.2.

Competing interests. The author has no competing interests.

Funding. This work was funded by the Roshydromet Targeted Scientific and Technical Program (TSTP), project 5.1.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
2. Океанография и морской лед. М.: Paulsen, 2011. 432 с.
3. Бобылев Л.П., Йоханнесен О.М., Шалина Е.В., Александров В.Ю., Сандвен С. Изменение ледяного покрова Северного Ледовитого океана в конце 20-го — начале 21-го веков по данным спутникового зондирования и других видов измерений // Океанография и морской лед / Под ред. И.Е. Фролова. М.; СПб.: Паулсен, 2011. С. 338–356.
4. Kwok R., Rothrock D.A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008 // Geophys. Res. Letters. 2009. V. 36. L15501.
5. Александров В.Ю., Йоханнесен О.М. Изменение толщины льда в Арктике с конца XIX века // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 4 (94). С. 63–73.
6. Гудкович З.М., Карклин В.П., Миронов Е.У., Иванов В.В., Лосев С.М., Дымент Л.Н., Смоляницкий В.М., Фролов С.В., Юлин А.В., Усольцева Е.А. Развитие ледовых и метеорологических условий в Арктике в период 2007–2013 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 90–102.

7. Афанасьева Е.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Демчев Д.М., Чуфарова М.С., Быченков Ю.Д., Девятаев О.С. Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 5–20.
8. Файловый сервер ААНИИ WDC Sea Ice. URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004> (дата обращения 05.05.2020).
9. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Формирование возрастного состава льда в юго-западной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3 (113). С. 16–26.
10. Хотченков С.В. Формирование возрастного состава ледяного покрова в море Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4 (114). С. 5–15.
11. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов / Под ред. Б.А. Крутских. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 56 с.
12. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Сезонные изменения возрастного состава льдов в северо-восточной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 4 (110). С. 41–50.
13. Giles K.A., Laxon S.W., Ridout A.L. Circumpolar thinning of Arctic sea ice following the 2007 record ice extent minimum // Geophys. Res. Letters. 2008. V. 35. L22502.
14. Фролов С.В., Федяков В.Е., Третьяков В.Ю., Клейн А.Е., Алексеев Г.В. Новые данные об изменениях толщины льда в Арктическом бассейне // Доклады Академии наук. 2009. Т. 425. № 1. С. 104–108.
15. Шалина Е.В., Бобылев Л.П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 28–41.
16. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И. Изменчивость ледовых условий плавания по трассам Северного морского пути за период 1997–2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 3. С. 328–340.
17. Kwok R., Cunningham G. F. Variability of Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2 // Philosophical Transactions of the Royal Society. 2015. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0157>.

REFERENCES

1. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1535 p.
2. *Okeanografiya i morskoi led*. Oceanography and sea ice. M.: Paulsen, 2011: 432 p. [In Russian].
3. Bobilev L.P., Johanessen O.M., Shalina Ye.V., Aleksandrov V.Yu., Sandven S. Changes of the Arctic Ocean ice cover in late 20th — early 21st centuries by the data satellite remote sensing and other kinds of measurements / Ed. By I.Ye. Frolov. Moscow; St. Petersburg: Paulsen Ltd., 2011: 338–356. [In Russian].
4. Kwok R., Rothrock D.A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008. *Geophys. Res. Letters*. 2008, 36: L15501.
5. Aleksandrov V.Yu., Johanessen O.M. Changes of ice thickness in the Arctic since the end of 19th century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2012, 4 (94): 63–73. [In Russian].
6. Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Mironov Ye.U., Ivanov V.V., Losev S.M., Dymant L.N., Smolyanitsky V.M., Frolov S.V., Yulin A.V., Usoltseva E.A. Development of ice and weather conditions in the Arctic during 2007–2013. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2013, 2 (96): 90–102. [In Russian].

7. Afanasieva Ye.V., Alekseyeva T.A., Sokolova Yu.V., Demchev D.M., Chufarova M.S., Bychenkov Yu.D., Devyatayev O.S. Methodology of ice chart compilation. *Rossiyskaya Arktika. The Russian Arctic*. 2019, 7: 5–20. [In Russian].
8. AARI WDC Sea Ice file server. Available at: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004> (accessed 05.05.2020).
9. Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolyanitsky V.M. Formation of the stages of sea ice development composition in the south-western part of the Kara Sea during autumn-winter season. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2017, 3 (113): 16–26. [In Russian].
10. Hotchenkov S.V. Stages of sea ice development in the Laptev Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2017, 4 (114): 5–15. [In Russian].
11. *Mezhdunarodnaia simvolika dlia morskikh ledovykh kart i nomenklatura morskikh l'dov*. International symbols for the sea ice charts and nomenclature of sea ice / Ed. by B.A. Krutskikh. Leningrad: Gidrometeoizdat Publishers, 1984: 56 p. [In Russian].
12. Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolyanitsky V.M. Seasonal changes in the stages of sea ice development in northeast part of the Kara Sea during the autumn and winter period. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2016, 4 (110): 41–50. [In Russian].
13. Giles K.A., Laxon S.W., Ridout A.L. Circumpolar thinning of Arctic sea ice following the 2007 record ice extent minimum. *Geophys. Res. Letters*. 2008, 35: L22502.
14. Frolov S.V., Fedyakov V.Ye., Tretiakov V.Yu., Klein A.E., Alekseyev G.V. New data on ice thickness changes in the Arctic Basin. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Science. 2009, 425, 1: 104–108. [In Russian].
15. Shalina Ye.V., Bobylev L.P. Changes of ice conditions in the Arctic in accordance with satellite observations. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Modern problems of the Earth remote sensing. 2017, 14, 6: 28–41. [In Russian].
16. Tretiakov V.Yu., Frolov S.V., Sarafanov M.I. Variability of ice navigation conditions along the North Sea Route lines during 1997–2018. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2019, 65, 3: 328–340. [In Russian].
17. Kwok R., Cunningham G.F. Variability of Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2015. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0157>.