

ОКЕАНОЛОГИЯ
OCEANOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-332-351>

УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Пространственные изменения осадки килей торосов
на акватории моря Лаптевых**

А.К. Наумов^{1}, Е.А. Скутина¹, Д.О. Якимушкин²*

¹ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

² — Арктический научный центр, Москва, Россия

**nmv_alex@rambler.ru*

Резюме

Настоящая статья посвящена изучению морфометрических особенностей нижней поверхности ледяного покрова на акватории моря Лаптевых. Основное внимание уделено изучению осадки килей торосистых образований и пространственной изменчивости этой величины.

Для проведения исследования использованы данные, полученные в течение нескольких (от двух до четырех) ледовых сезонов в период с 2014 по 2019 г. с помощью гидролокаторов верхнего обзора, входивших в состав притопленных автономных буйковых станций (ПАБС). Станции располагались в пяти точках на акватории моря Лаптевых. Полученные на станциях ряды наблюдений за осадкой ледяного покрова позволили выделить информацию об осадке килей торосистых образований в отдельных точках акватории моря. В результате были сформированы выборки значений осадки килей торосов по отдельным ледовым сезонам для каждой из пяти станций. Далее была выполнена статистическая обработка полученных данных. В частности, для каждого из ледовых сезонов была проведена проверка на однородность средних значений и дисперсий выборок по станциям, а также проверка на совпадение их распределений. Сравнительный анализ данных методами математической статистики позволил описать пространственную изменчивость осадки килей торосистых образований на акватории моря Лаптевых для отдельных ледовых сезонов. По результатам проведенного анализа были определены «ключевые» точки (станции), описывающие пространственную изменчивость осадки килей торосистых образований для всех рассмотренных ледовых сезонов, что, в случае необходимости, позволяет планировать дальнейшие исследования осадки льда с применением ПАБС (определять необходимое число станций и точки их установки).

Ключевые слова: критерии однородности, ледяной покров, море Лаптевых, осадка льда, торос, торосистое образование.

Для цитирования: Наумов А.К., Скутина Е.А., Якимушкин Д.О. Пространственные изменения осадки килей торосов на акватории моря Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 4. С. 332–351. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-332-351>.

Поступила 27.07.2022

После переработки 18.11.2022

Принята 25.11.2022

Spatial variations of the hummocks keel draft in the Laptev Sea area

Alexey K. Naumov^{1*}, Elena A. Skutina¹, Dmitriy O. Yakimushkin²

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² — Arctic research center, Moscow, Russia

*nmv_alex@rambler.ru

Summary

The article investigates the morphometric features of the ice cover lower surface in the Laptev Sea area. The main attention is paid to the study of the hummocked formations' keel draft and the spatial variability of this quantity. The data for the research were obtained during several ice seasons (from two to four) in the period 2014-2019 using upward-looking sonars, which were part of the submerged autonomous buoy stations (SABS). The stations were installed at five points in the Laptev Sea area. The data obtained from a series of observations of the ice cover draft allowed extracting information on the hummocked formations' keel draft at separate points of the sea area. As a result, samples of values of the hummocks keel draft were formed for separate ice seasons for each of the five stations. Further, a statistical processing of the data obtained was performed. In particular, for each of the ice seasons we checked the homogeneity of the mean values and of the distribution of samples by stations. Also checked was the distribution matching. A comparative data analysis using methods of mathematical statistics made it possible to describe the spatial variability of the hummocked formations' keel draft in the Laptev Sea area for separate ice seasons. The "key" points (stations) describing the spatial variability of the hummocked formations' keel draft for all the ice seasons considered were determined according to the results of the analysis performed, which allows planning further ice draft research using SABS, if required (to determine the necessary number of stations and points of their installation).

Keywords: homogeneity criteria, hummock, ice cover, ice draft, ice ridge, Laptev Sea.

For Citation: Naumov A.K., Skutina E.A., Yakimushkin D.O. Spatial variations of the hummocks keel draft in the Laptev Sea area. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (4): 332–351. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-332-351>.

Received 27.07.2022

Revised 18.11.2022

Accepted 25.11.2022

ВВЕДЕНИЕ

В связи с активным освоением шельфа арктических морей России в последнее время в ходе проведения работ возникает необходимость в определении параметров ледяного покрова. С 2012 г. ФГБУ «АНИИ» по заказу ПАО «НК «РОСНЕФТЬ»» выполняет на акваториях арктических морей ледоисследовательские работы с целью сбора океанографической и ледовой информации. На акваториях морей Карского, Лаптевых и Чукотского устанавливаются притопленные автономные буйковые станции (ПАБС), в состав которых входит гидролокатор верхнего обзора, предназначенный для сбора данных по осадке ледяных образований, дрейфующих над прибором.

Подобные работы проводились неоднократно. На шельфе Сахалина были получены данные об осадке льда с помощью акустических профилографов, установленных на длительный период [1].

В работе [2] представлены результаты измерений осадки на трех станциях в море Бофорта за продолжительный период времени. Также проведено сравнение данных по станциям и сезонам. Примечательно, что места постановки станций находились на большой глубине (более 3000 м).

В настоящей работе анализируются материалы, полученные на акватории моря Лаптевых: в тексте приведены описания исходных данных и ледовых условий, в которых они были получены; выполнен сравнительный анализ результатов измерений, полученных с помощью ПАБС в течение нескольких ледовых сезонов.

Целями статьи являются: 1) выявление пространственной изменчивости осадки ледяных образований на акватории моря Лаптевых с помощью применения различных статистических критериев; 2) определение «ключевых точек» на акватории моря — точек, установки станций, данные с которых описывают пространственную изменчивость осадки килей торосистых образований для всех ледовых сезонов.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа пространственных изменений осадки льда в море Лаптевых были использованы данные об осадке килей торосов за 4 ледовых сезона: 2014/15, 2015/16, 2016/17 и 2018/19 гг. За указанные периоды с помощью ПАБС, установленных в пяти точках моря Лаптевых, было обследовано чуть более 45000 км профиля ледяного покрова (табл. 1, рис. 1).

В каждом из четырех рассматриваемых ледовых сезонов число станций, на которых получены данные по осадке льда, колеблется от 3 до 5. Наиболее протяженные профили ледяного покрова исследованы на станциях 11 и 12.

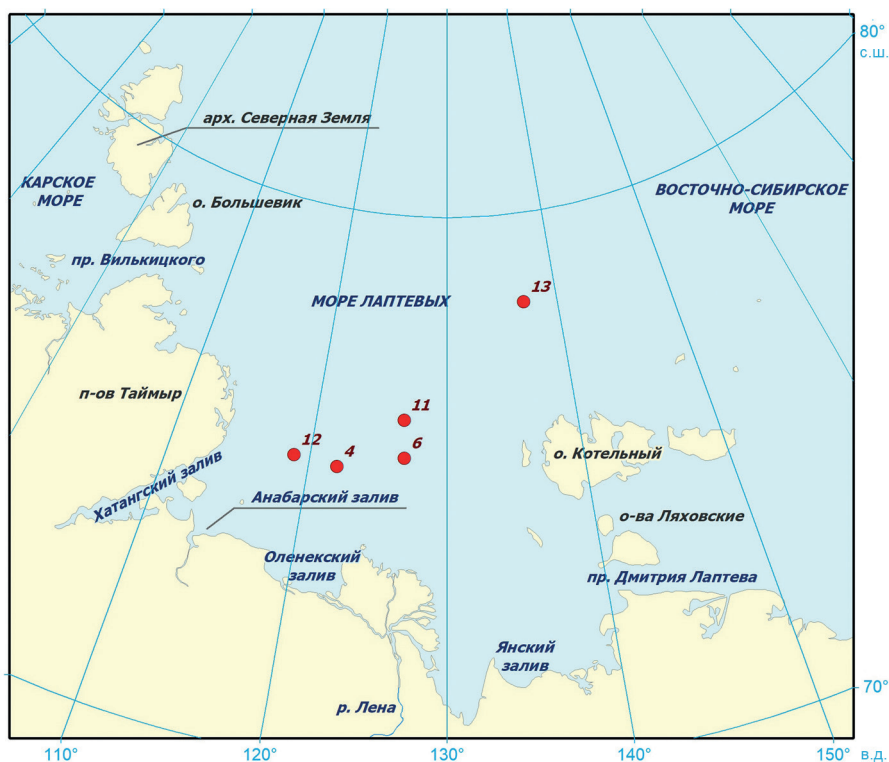


Рис. 1. Схема расположения ПАБС на акватории моря Лаптевых в период 2014–2017 и 2018/19 гг.

Fig. 1. The layout of the setting points of underwater autonomous buoy stations in the Laptev Sea in the period 2014–2017 and 2018/19

Характеристика исходных данных по осадке льда, полученных на акватории моря Лаптевых в период 2014–2017 и 2018/19 гг.

Table 1

Characteristics of the initial data of the ice draft obtained in the Laptev Sea in the period 2014–2017 and 2018/19

Станция №	Протяженность ледового профиля (км)			
	2014/15	2015/16	2016/17	2018/19
4	—	3598	2586	—
6	—	3610	1955	2232
11	3491	3599	2839	2400
12	3956	2276	3383	3415
13	3480	3785	—	—

Для получения информации о нижней поверхности ледяного покрова использовался гидролокатор верхнего обзора для профилирования льда (IPS — *англ.* ice profiling sonar). Полученные данные (серии измерений осадки ледяного покрова в точках установки оборудования) позволили проследить внутригодовую (внутрисезонную), межгодовую (межсезонную) и пространственную изменчивость значений осадки льда для каждой станции, а также проанализировать пространственную изменчивость этой величины внутри отдельных сезонов.

Данные, полученные с гидролокатора, — это ряд значений (осадка льда, расстояние от начала профиля) с дискретностью 1 с. Обработка данных проводилась в несколько этапов:

1. Первичная обработка — проверка исходных данных на наличие выбросов.
2. Фильтрация данных.

На данном этапе проводится уменьшение объема данных за счет выбора из исходного ряда по осадке льда локальных экстремумов и замены цепочек неменяющихся значений осадки на пары начало–конец цепочки.

3. Выделение килей торосов и участков ровного льда.

На данном этапе в отфильтрованном ряду:

а) выделяются значения осадки, относящиеся к участкам ровного и восторщенного льда (выборки по станциям разбиваются на месячные серии, для каждой серии визуально оценивается средняя осадка ровного льда h , тогда участки ровного льда — участки с осадкой $h \pm 0,1h$, за участки наложенного льда принимаются участки с относительно ровной осадкой h_1 : $1,1h < h_1 \leq 2h$; остальные участки рассматриваются как участки восторщенного льда;

б) в зависимости от осадки ровного льда на исследуемом профиле, с учетом имеющихся данных о соотношении геометрических размеров торосов, восторщенные участки исследуемого ледового профиля, находящиеся рядом, могут быть объединены как относящиеся к одному торосу;

в) после выявления участков льда, относящихся к одному торосу, определяются значения осадки килей отдельных торосов.

Подробно методика обработки данных изложена в работе [3]. Данная работа посвящена изучению осадки торосистых образований, поэтому в данном случае в результате обработки данных гидролокатора мы формируем двумерный массив, где первый столбец — расстояние от начала ледового профиля (м), второй — осадка килей тороса (м). Сформированный таким образом ряд служит исходными данными

для оценки основных статистических характеристик осадки килей торосов на исследованном за время работы гидролокатора профиле.

Для сравнительного анализа выборок, содержащих осадки килей на различных станциях, были проведены:

- проверка на однородность средних значений выборок;
- проверка на однородность дисперсий выборок;
- проверка на совпадение распределений выборок.

Анализ выполнялся попарным сравнением имеющихся выборок и их характеристик.

Для проверки гипотезы об однородности распределений использовался классический критерий Колмогорова–Смирнова [4]. В некоторых случаях проводилась дополнительная проверка по критериям Лемана–Розенблатта и Андерсона–Дарлингга, обладающих, во многих случаях, большей мощностью [5–7, 8–11].

Для сравнения месячных серий осадки килей торосов, полученных на разных станциях, необходимо учитывать, что количество данных на различных станциях неодинаково. Чтобы учесть эту особенность, для сравнения средних значений месячных выборок был применен критерий Тьюки для выборок разного объема [4].

С помощью стандартного критерия Левене [12] проверялись гипотезы об однородности дисперсий исследуемых выборок.

РАЗВИТИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ В ИССЛЕДУЕМЫХ ЛЕДОВЫХ СЕЗОНАХ

Для описания ледовых условий в море Лаптевых в периоды работы ПАБС и получения серии наблюдений за осадкой льда были проанализированы ледовые карты за сезоны 2014/15, 2015/16, 2016/17 и 2018/19 гг. (http://old.aari.ru/odata/_d0004.php). Согласно картам, можно выделить следующие особенности развития ледяного покрова:

– развитие ледяного покрова в *ноябре* было для сезонов различным, более легкая картина отмечалась для 2014 и 2018 гг. (преобладание на акватории южнее 82° с. ш. серых и серо-белых льдов, небольшое количество тонких однолетних льдов), более тяжелые — в 2015 и 2016 гг. (наличие большей площади однолетних тонких льдов, а также старых и остаточных льдов в северной части моря);

– в *декабре* каждого из рассматриваемых ледовых сезонов наблюдалось развитие ледяного покрова и переход серо-белых льдов в градацию однолетних тонких льдов, которые стали преобладающими на всей акватории моря, — это говорит о более интенсивном нарастании льда в сезонах 2014/15 и 2018/19 гг.; в то же время при сглаживании различий в возрастном составе льда на всей акватории моря Лаптевых в декабре 2015 г. появились однолетние средние льды, для декабря 2016 г. было характерно наличие старых и остаточных льдов в северо-восточной части моря, то есть в декабре для сезонов 2015/16 и 2016/17 гг. в море Лаптевых по-прежнему отмечались более тяжелые ледовые условия (по сравнению с сезонами 2014/15 и 2018/19 гг.);

– в *январе* развитие ледяного покрова продолжилось: для всех сезонов отмечено наличие однолетних средних льдов, однако их граница от сезона к сезону располагается по-разному; более близкими являются границы однолетних средних льдов, зафиксированные в январе 2015 и 2019 гг., а также в январе 2016 и 2017 гг.;

– в *феврале* переход градации однолетних тонких льдов в однолетние средние продолжился, а в 2016 и 2017 гг. на акватории моря, расположенной южнее 82° с. ш., было отмечено появление однолетних толстых льдов; площадь однолетних средних льдов увеличилась; однолетние тонкие льды на акватории также сохранялись, но их площадь

сократилась, эти льды располагались полосой вдоль арх. Северная Земля, побережья п-ова Таймыр и материкового побережья до района устья р. Лены (для всех сезонов) и далее к северному побережью о. Котельный (за исключением февраля 2016/17 г.);

– в *марте* однолетние толстые льды отмечались на акватории моря Лаптевых уже во всех рассматриваемых сезонах; положение границы однолетних толстых льдов было примерно одинаковым в марте 2016 и 2017 гг. (с небольшим сдвигом в центральной части моря к юго-западу в 2016 г.); а в марте 2015 и 2019 гг. эта граница располагалась севернее на $0,5\text{--}1^\circ$ по широте на всей акватории моря Лаптевых;

– в *апреле* в 2016, 2017 и 2019 гг. практически все однолетние тонкие льды перешли в градацию однолетних средних; в 2015 г. такой переход осуществился лишь на половине акватории, занятой однолетними тонкими льдами, однако граница распространения однолетних толстых льдов продвинулась значительно южнее вдоль меридианов $120\text{--}130^\circ$ в. д. (до 76° с. ш.), по сравнению с апрелем 2016, 2017 и 2019 гг.; границы распространения толстых однолетних льдов для всех рассматриваемых сезонов сблизились;

– в *мае* возрастной состав льдов и их распространение по акватории моря Лаптевых сохранялся по сравнению с апрелем; установившиеся в апреле границы льдов разных возрастов немного сместились и в итоге практически совпали для всех рассматриваемых сезонов (2014/15, 2015/16, 2016/17 и 2018/19 гг.);

– в *июне* началось очищение акватории от льда, которое продолжилось в июле.

Таким образом, рассматриваемые сезоны, во время которых на акватории моря Лаптевых работали ПАБС, можно разделить на 2 группы (первая — 2014/15 и 2018/19 гг., вторая — 2015/16 и 2016/17 гг.), различия между которыми наблюдались в период с ноября по март (в начале ледовых сезонов 2014/15 и 2018/19 гг. наблюдались более легкие ледовые условия по сравнению с сезонами 2015/16 и 2016/17 гг.). В период максимального развития ледяного покрова (апрель–май) различия практически исчезли.

По данным региональных ледовых карт (http://old.aari.ru/odata/_d0004.php), ледовые условия во всех точках проведения измерений (в точках установки ПАБС) в течение каждого ледового сезона практически совпадают. Исключением является станция 13, где в январе–мае наблюдается более толстый лед (на одну градацию по толщине, согласно Номенклатуре морских льдов [13]), чем на станциях 4, 6, 11 и 12. Это объясняется в первую очередь расположением станции 13, которая находится севернее и наиболее удалена от остальных станций (рис. 1).

СЕЗОН 2014/15 г.

В ледовом сезоне 2014/15 г. данные по осадке льда были получены в точках постановки станций 11, 12 и 13 (рис. 1).

Применение критериев сравнения для сезонных серий (данных со станций за весь сезон) показало значимое различие в средних значениях между всеми станциями за весь ледовый сезон (результат попарного сравнения с применением *t*-критерия). Вместе с этим можно отметить определенную близость (общий вид графика) хода среднемесячных значений (рис. 2а).

На рис. 2б приведены распределения осадки килей (значения функции $F(x) = 1 - \text{CDF}(x)$, где $\text{CDF}(x)$ — значения распределения накопленной плотности вероятности величины осадки килей торосов (от *англ.* cumulative density function), полученные по данным для всего ледового сезона. Несмотря на близость функций распределения осадки килей на станциях (рис. 2б), применение критериев сравнения показало значимое различие средних за сезон величин осадки килей торосистых образований.

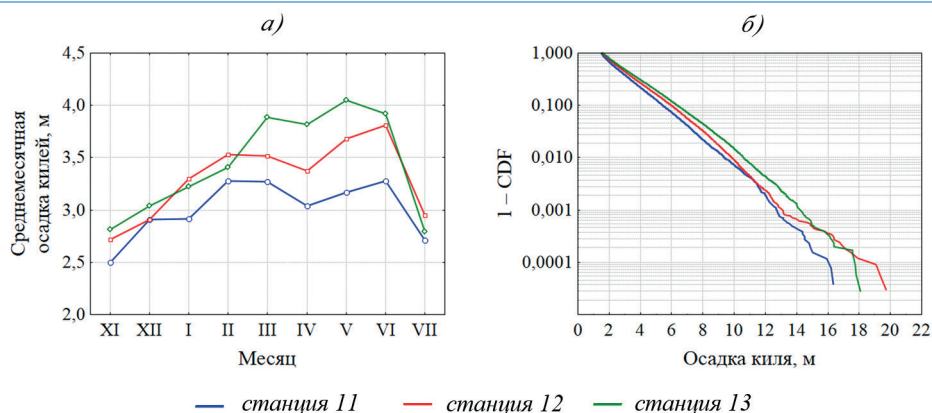


Рис. 2. Среднемесячные значения (а) и распределение значений (б) осадки килей торосистых образований по данным всего ледового сезона 2014/15 г.

Fig. 2. Mean monthly values (a) and the distribution of the draft values (б) of ice ridge keels according to the data of the entire ice season 2014–2015

Дисперсионный анализ сезонных серий для станций 11, 12 и 13 показал, что в целом за сезон 2014/15 г. наибольшее различие наблюдалось между станциями 11 и 13, наименьшее — между станциями 12 и 13.

В течение ледового периода форма распределения осадок килей торосистых образований сильно изменяется от месяца к месяцу на каждой из рассматриваемых станций (рис. 3). По функции распределения очень хорошо прослеживается сезонный ход осадки деформированного льда: начиная с ноября она «движется» вправо до периода максимального развития ледяного покрова, затем «возвращается» назад в июле.

Всего за сезон 2014/15 г. было получено по 9 месячных серий (выборок) на каждой из 3 станций. Для сравнения месячных серий осадки килей торосов, полученных на разных станциях, необходимо учитывать, что количество данных на различных станциях неодинаково. Чтобы учесть эту особенность, для сравнения средних значений месячных выборок используем критерий Тьюки для выборок разного объема [4]. Для сравнения дисперсий используем стандартный критерий Левене [12].

Применение критерия Тьюки для выборок разного объема показало, что в средних значениях различия осадки килей в начале сезона (в ноябре) незначимы для станций 12 и 13, в декабре — для станций 11 и 12, в январе — для станций 12 и 13; по мере развития ледяного покрова различия для всех станций становятся значимыми; в конце сезона (июль) незначимыми становятся различия в средних для станций 11 и 13.

При попарном сравнении дисперсий месячных серий с помощью стандартного критерия Левене было выявлено, что для станций 11 и 12 различия незначимы в декабре, марте и июне; для станций 11 и 13 — в декабре и марте; для станций 12 и 13 для всех месяцев различия выборочных дисперсий являются значимыми.

На рис. 4 представлено распределение осадки килей торосов по месяцам на различных станциях. Несмотря на хорошее визуальное совпадение, применение критерия согласия Колмогорова–Смирнова показало, что незначимые различия обнаружены лишь для следующих пар выборок: станции 11 и 12 за декабрь, станции 12 и 13 за ноябрь.

Обобщенные результаты сравнения месячных серий наблюдений за осадкой торосистых образований с использованием статистических критериев, учитывающих разные объемы исследуемых выборок, представлены в табл. 2.

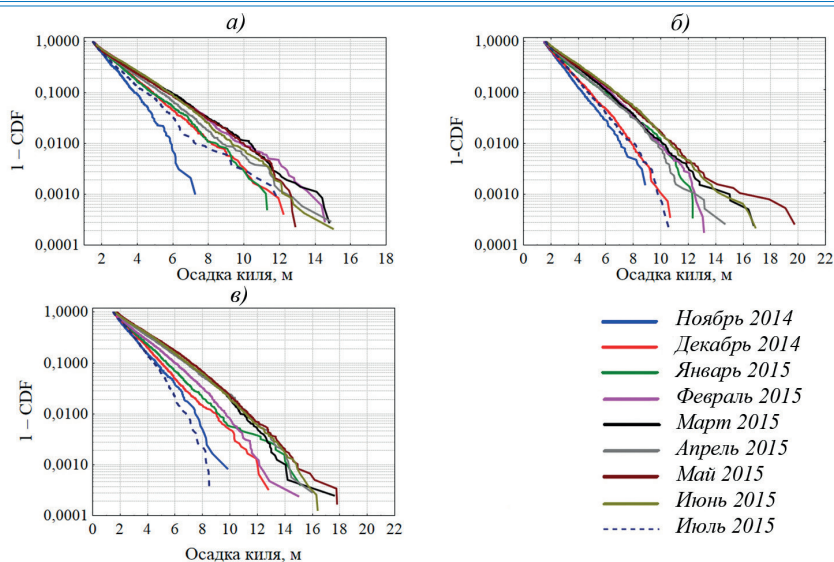


Рис. 3. Функции распределения осадок килей торосистых образований по станциям 11 (а), 12 (б) и 13 (в) в течение ледового сезона 2014/15 г.

Fig. 3. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by stations 11 (a), 12 (б) and 13 (в) during the ice season 2014–2015

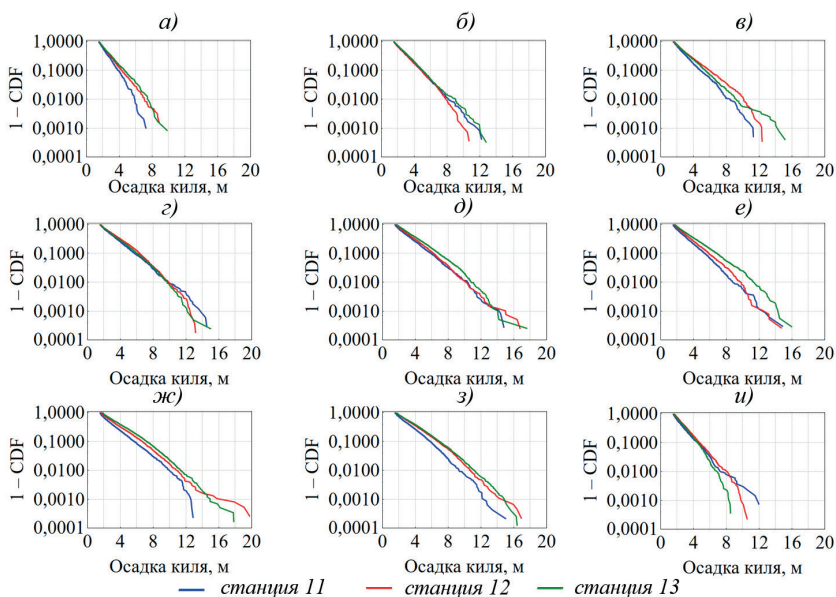


Рис. 4. Распределение осадки килей торосистых образований в течение ледового сезона 2014/15 г. по месяцам:

а) — ноябрь 2014 г., б) — декабрь 2014 г., в) — январь 2015 г., з) — февраль 2015 г., д) — март 2015 г., е) — апрель 2015 г., ж) — май 2015 г., з) — июнь 2015 г., у) — июль 2015 г.

Fig. 4. Distribution functions of the draft of ice ridge keels during the ice season 2014–2015 by months
а) — November, 2014, б) — December, 2014, в) — January, 2015, з) — February, 2015, д) — March, 2015, е) — April, 2015, ж) — May, 2015, з) — June, 2015, у) — July, 2015

**Месяцы с незначимыми различиями по месячным сериям,
полученным на станциях 11, 12, 13 в ледовом сезоне 2014/15 г.**

Table 2

**Months with insignificant differences in the monthly series
received at stations 11, 12, 13 in the ice season 2014/2015**

Пары станций	Сравнение средних	Сравнение дисперсий	Сравнение распределений
11–12	XII	XII, III, VII	XII
11–13	VII	XII, II	–
12–13	XI, I	–	XI

С учетом анализа средних, можно сказать, что «близость» месячных выборок проявилась лишь в начале ледового сезона. В этот период для станций 11 и 12 средние, дисперсии и распределения различаются незначимо, что позволяет отнести осадки килей на этих станциях в декабре к одной выборке. Согласно данным ледовых карт, ледовые условия на этих станциях практически совпадали.

Также можно отметить, что в месяцы, когда различия были незначимы, длины исследованных ледовых профилей на станциях были достаточно близки.

В целом распределения выборок осадки килей торосов в районах установки станций по месяцам практически во всех случаях имеют значимые различия. Следовательно, в целом за сезон 2014/15 г. значения осадки килей торосов в разных районах акватории моря Лаптевых (станции находились на достаточном удалении друг от друга, рис. 1) значимо отличались друг от друга.

СЕЗОН 2015/16 г.

В этом сезоне, в отличие от предыдущего, были собраны данные на пяти станциях: 4, 6, 11, 12 и 13 (см. рис. 1). Применение критериев сравнения для сезонных выборок выявило значимое различие в средних значениях между всеми станциями за весь ледовый сезон (вывод по результатам попарного сравнения с применением *t*-критерия).

Ход среднемесячных значений на станциях 6, 11 и 13 был очень близок (рис. 5а). Данные на станции 12 имеются лишь до марта. Среднемесячные осадки килей на станции 4 в апреле имеют выраженный «провал» (наблюдается резкое уменьшение среднего значения осадки по сравнению с предыдущим и последующим месяцами).

Функции распределения для всех станций за весь ледовый сезон представлены на рис. 5б. Сравнение распределений для всего ледового сезона 2015/16 г. подтвердило значимость различий для всех пар станций.

Функция распределения, так же как и для предыдущего сезона, имеет ярко выраженный сезонный ход (рис. 6).

Дисперсионный анализ сезонных серий для станций 4, 6, 11, 12 и 13 показал, что в целом за сезон 2015/16 г. наибольшее различие наблюдалось между станциями 12 и 13, наименьшее — между станциями 4 и 13. В порядке возрастания различий между станциями (от наименьших различий к наибольшим) сформировалась следующая цепочка: 4–13 → 6–11 → 4–11 → 6–12 → 11–13 → 4–6 → 11–12 → 6–13 → 4–12 → 12–13.

Для ледового сезона 2015/16 г. было получено по 9 месячных серий (выборок) на станциях 4, 6, 11, 13 и 6 выборок на станции 12.

В результате применения критерия Тьюки для выборок неравного объема было выявлено, что в средних значениях в начале сезона (в декабре) различия незна-

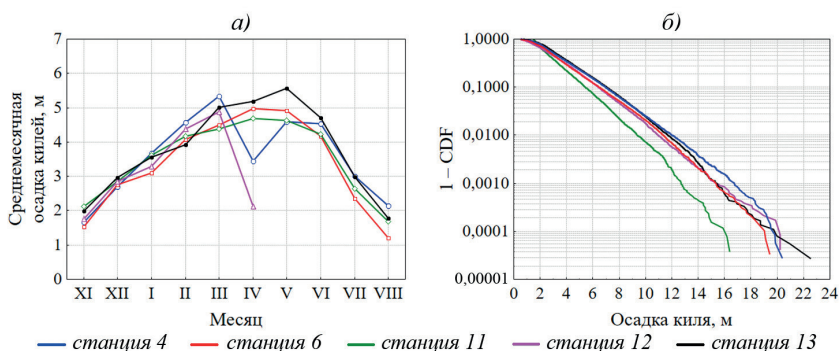


Рис. 5. Среднемесячные значения (а) и распределение значений (б) осадки килей торосистых образований по данным ледового сезона 2015/16 г.

Fig. 5. Mean monthly values (a) and the distribution of the draft values (б) of ice ridge keels according to the data of the entire ice season 2015/2016

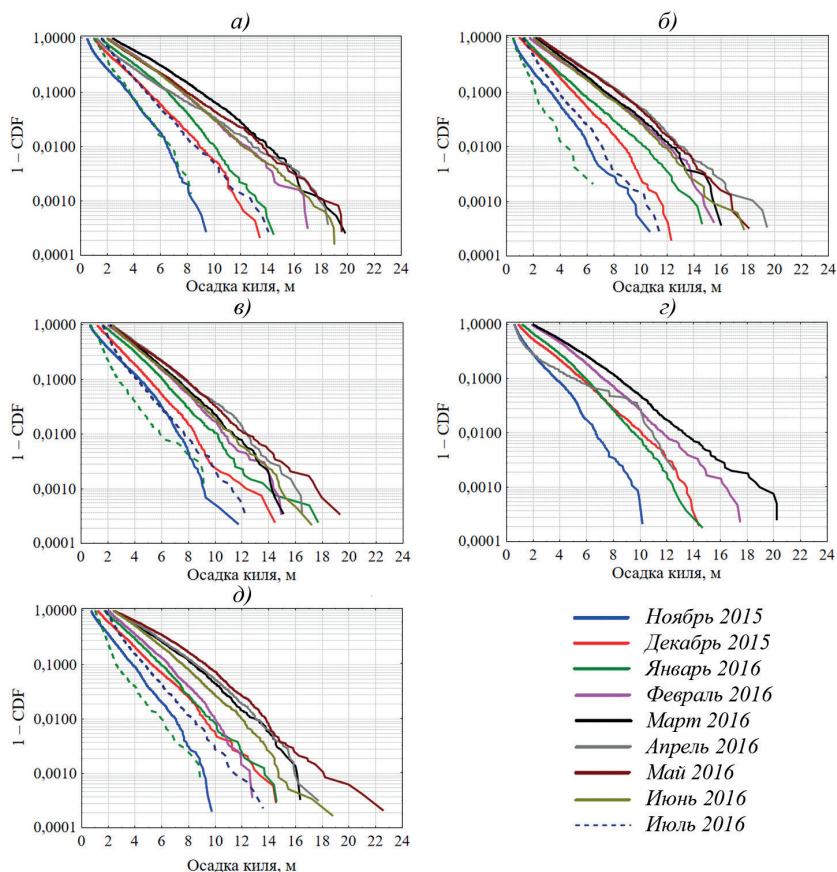


Рис. 6. Функции распределения осадок килей торосистых образований по станциям 4 (а), 6 (б), 11 (в), 12 (г) и 13 (д) в течение ледового сезона 2015/16 г.

Fig. 6. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by stations 4 (a), 6 (б), 11 (в), 12 (г) and 13 (д) during the ice season 2015/2016

чимы для станций 4 и 6, 6 и 11 и 11–12–13; в январе — для станций 4–11–13; по мере развития ледяного покрова различия для всех станций становятся значимыми; в конце сезона (июнь–июль) незначимыми становятся различия средних значений для станций 4–13, 6–11, 11–13.

Сравнение дисперсий выборок (попарное сравнение с использованием стандартного критерия Левене) показало, что в начале сезона (ноябрь) различия незначимы для станций 4–12–13; в январе — на станциях 6–11–13. В конце сезона незначимо отличаются выборочные дисперсии на станциях 6–11 и 6–13.

На рис. 7 представлено распределение осадки килей торосов по месяцам на различных станциях. Функции распределения месячных серий, полученных на станциях в 2015/16 г., визуально очень похожи (особенно для ноября, декабря и января). Между тем по результатам применения критериев Колмогорова–Смирнова, Лемана–Розенблатта и Андерсона–Дарлинга можно сделать вывод о том, что различия в распределениях осадки килей торосов по месяцам является значимым практически для всех пар станций. Незначимыми оказались лишь различия для пар станций 6–11 в марте и 11–13 в декабре.

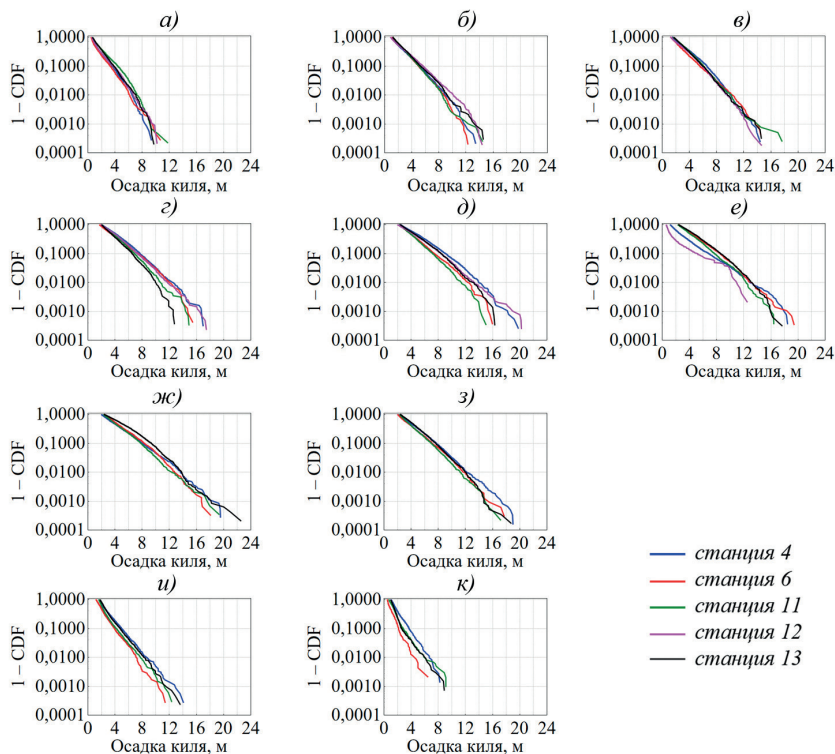


Рис. 7. Распределение осадки килей торосистых образований по месяцам в течение ледового сезона 2015/16 г.:

a) — ноябрь 2015 г., *б)* — декабрь 2015 г., *в)* — январь 2016 г., *з)* — февраль 2016 г., *д)* — март 2016 г., *е)* — апрель 2016 г., *жс)* — май 2016 г., *з)* — июнь 2016 г., *и)* — июль 2016 г., *к)* — август 2016 г.

Fig. 7. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by months during the ice season 2015/2016

a) — November, 2015, *б)* — December, 2015, *в)* — January, 2016, *з)* — February, 2016, *д)* — March, 2016, *е)* — April, 2016, *жс)* — May, 2016, *з)* — June, 2016, *и)* — July, 2016, *к)* — August, 2016

Месяцы с незначимыми различиями по месячным сериям,
полученным на станциях 4, 6, 11, 12, 13 в ледовом сезоне 2015/16 г.

Table 3

Months with insignificant differences in the monthly series
received at stations 4, 6, 11, 12, 13 in the ice season 2015/16

Пары станций	Сравнение средних	Сравнение дисперсий	Сравнение распределений
4–6	XII	II, IV	–
4–11	I, V	–	–
4–12	–	XI	–
4–13	I, VII	XI, XII, IV	–
6–11	XII, II, III, VI	I, VII	III
6–12	–	–	–
6–13	II	I, IV, VI	–
11–12	XII	IV	–
11–13	XII, I	I	XII
12–13	I, III	XI	–

Обобщенные результаты сравнения месячных серий наблюдений за осадкой торосистых образований с использованием статистических критериев, учитывающих разные объемы исследуемых выборок, представлены в табл. 3.

Таким образом, «близость» месячных выборок по средним значениям и дисперсиям отмечается в основном в начале ледового сезона. Распределения выборок осадки килей по месяцам практически во всех случаях имеют значимые различия.

На основании анализа средних, дисперсии и распределений наибольшая «близость» наблюдается для станций 6–11 и 11–13 в начале ледового сезона. При этом отметим, что станции 6 и 11 расположены достаточно близко друг к другу и станция 6 чуть более удалена от станции 13 (по сравнению со станцией 11).

В сезоне 2015/16 г. серии наблюдений были получены на всех 5 станциях. В качестве показателя различия параметров осадки килей торосов на станциях можно выбрать максимальное расстояние из критерия Колмогорова–Смирнова.

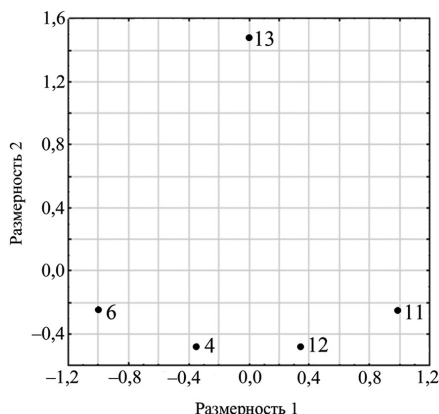


Рис. 8. Результат многомерного шкалирования по данным ледового сезона 2015/16 г.: различие между станциями по осадкам килей торосов в 2 измерениях

Fig. 8. The result of multidimensional scaling according to the data of the 2015/2016 ice season: the difference between stations in the draft of ice ridge keels in two dimensions

Вычисление данных величин и дальнейшее многомерное шкалирование в пространстве двух измерений позволяет получить картину, напоминающую разнесение станций в пространстве. Результат многомерного шкалирования приведен на рис. 8.

Таким образом, по результатам анализа данных, полученных за ледовый сезон 2015/16 г., можно сделать следующий вывод: в целом за сезон значения осадки килей в разных районах акватории моря Лаптевых значительно отличались друг от друга, в то время как в начале ледового сезона различия были незначимы на ближайших друг к другу станциях 6 и 11.

СЕЗОН 2016/17 г.

В ледовом сезоне 2016/17 г. были получены серии наблюдений на четырех станциях: 4, 6, 11 и 12 (см. рис. 1).

Ход среднемесячных значений показан на рис. 9а. Данные на станции 6 имеются лишь до мая. Среднемесячные осадки килей на станции 12 имеют небольшой «провал» в феврале. Применение критериев сравнения для сезонных выборок показало значимое различие в средних значениях между всеми станциями за весь ледовый сезон (вывод по результатам попарного применения *t*-критерия).

Функции распределения для всех станций за весь ледовый сезон представлены на рис. 9б. Сравнение распределений для всего сезона показало значимость различий для всех пар станций.

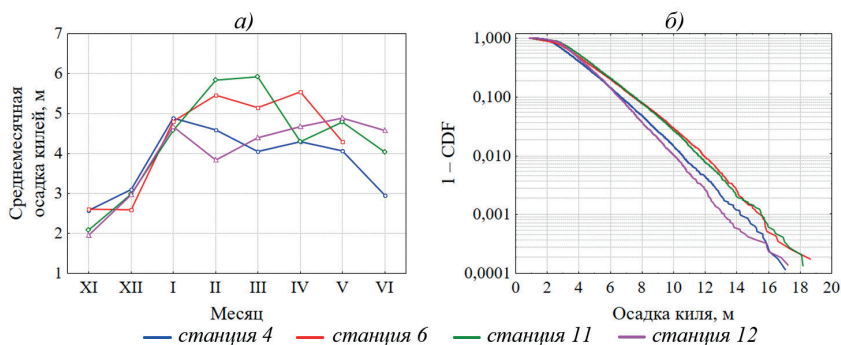


Рис. 9. Среднемесячные значения (а) и распределение значений (б) осадки килей торосистых образований для всего ледового сезона 2016/17 г.

Fig. 9. Mean monthly values (a) and the distribution of the draft values (b) of ice ridge keels according to the data of the entire ice season 2016/2017

Дисперсионный анализ сезонных серий для станций 4, 6, 11 и 12 показал, что в целом за сезон 2016/17 г. наибольшее различие наблюдалось между станциями 6 и 11, наименьшее — между станциями 4 и 12. В порядке возрастания различий между станциями (от пары с наименьшими различиями к паре с наибольшими) получается следующая последовательность:

4–12 → 4–6 → 11–12 → 6–12 → 4–11 → 6–11.

Если говорить о месячных сериях, то за сезон 2016/17 г. было получено по 8 выборок на станциях 4, 11 и 12, 7 — на станции 6 (данные только до мая).

Функция распределения месячных значений, так же как и для предыдущих сезонов, имеет ярко выраженный сезонный ход (рис. 10).

Применение критериев сравнения выборочных средних и дисперсий позволило сформулировать следующие особенности:

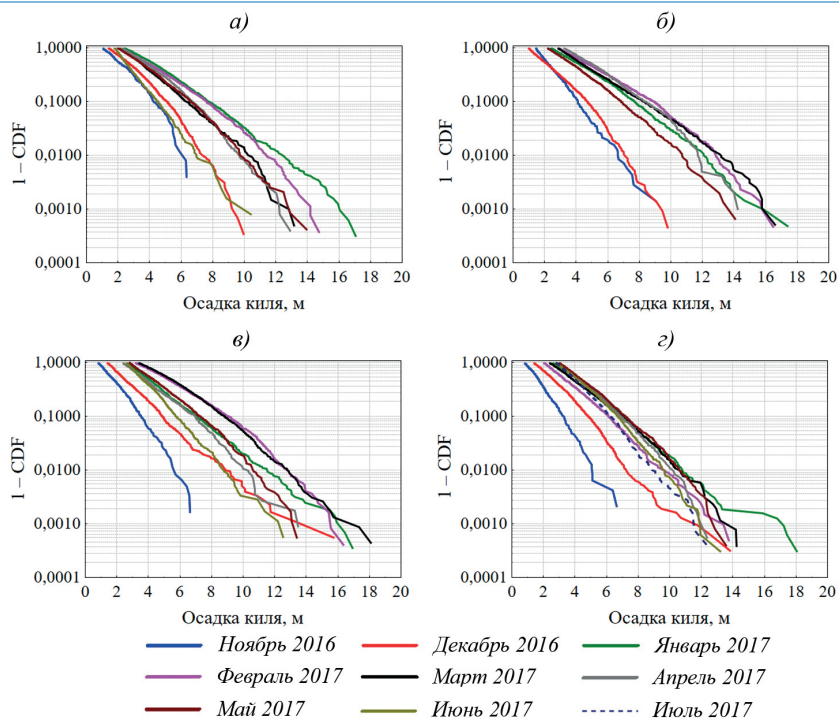


Рис. 10. Функции распределения осадок килей торосистых образований по станциям 4 (а), 6 (б), 11 (в) и 12 (г) в течение ледового сезона 2016/17 г.

Fig. 10. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by stations 4 (a), 6 (б), 11 (в) and 12 (г) during the ice season 2016/2017

- в средних значениях в начале сезона (в ноябре) различия незначимы для станций 4–6 и 11–12, в декабре — для станций 11–12; в январе — для станций 4–6, 6–12 и 11–12; по мере развития ледяного покрова различия для всех станций становятся значимыми (аналогичные результаты получены и в предшествующих сезонах);
- различия дисперсий в начале сезона незначимы станций 4–6–11; для середины сезона различия дисперсий незначимы для пары станций 6–11.

Таблица 4

Месяцы с незначимыми различиями по месячным сериям, полученным на станциях 4, 6, 11, 12 в ледовом сезоне 2016/17 г.

Table 4

Months with insignificant differences in the monthly series received at stations 4, 6, 11, 12 in the 2016/17 ice season

Пары станций	Сравнение средних	Сравнение дисперсий	Сравнение распределений
4–6	XI, I	XII, I, V	I
4–11	IV	XI, IV, V	–
4–12	–	–	–
6–11	–	XI, XII, II, III, V	III
6–12	I	–	–
11–12	XI, XII, I, V	I	–

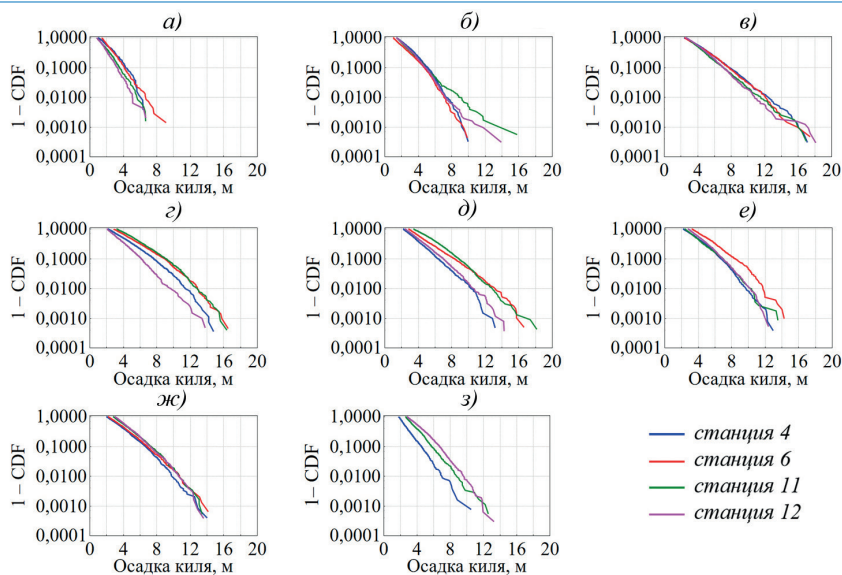


Рис. 11. Распределение осадки килей торосистых образований по месяцам в течение ледового сезона 2016/17 г.:

а) — ноябрь 2016 г., б) — декабрь 2016 г., в) — январь 2017 г., г) — февраль 2017 г., д) — март 2017 г., е) — апрель 2017 г., ж) — май 2017 г., з) — июнь 2017 г.

Fig. 11. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by months during the ice season 2016/2017 а) — November, 2016, б) — December, 2016, в) — January, 2017, г) — February, 2017, д) — March, 2017, е) — April, 2017, ж) — May, 2017, з) — June, 2017

Функции распределения месячных серий для различных станций, приведенные на рис. 11, визуально очень похожи. Особенно для января и мая. Между тем различия в распределениях месячных серий являются значимыми практически для всех пар станций. Незначимыми являются лишь различия для пары станций 4–6 в ноябре.

Обобщенные результаты сравнения месячных серий наблюдений за осадкой торосистых образований с использованием статистических критериев, учитывающих разные объемы исследуемых выборок, представлены в табл. 4.

Согласно имеющимся данным, однородность месячных выборок по средним значениям и дисперсиям проявлялась в основном в начале ледового сезона. На основании анализа средних, дисперсий и распределений наибольшая «близость» наблюдалась для наиболее близко расположенных станций 4–6, а также 6–11.

Распределения выборок осадки килей по месяцам на протяжении всего ледового сезона 2016/17 г. практически во всех случаях имеют значимые различия.

СЕЗОН 2018/19 г.

Данные в период ледового сезона 2018/19 г. были получены на 3 станциях: 6, 11 и 12 (см. рис. 1).

Ход среднемесячных значений на станциях 6, 11 и 12 показан на рис. 12а. В отличие от предыдущих случаев, никаких так называемых «провалов» в среднемесячных значениях осадки килей в середине сезона не наблюдалось. Применение критериев сравнения для сезонных выборок показало, что, как и во всех предыдущих случаях, наблюдалось значимое различие в средних значениях между всеми станциями за весь ледовый сезон (результат попарного применения *t*-критерия).

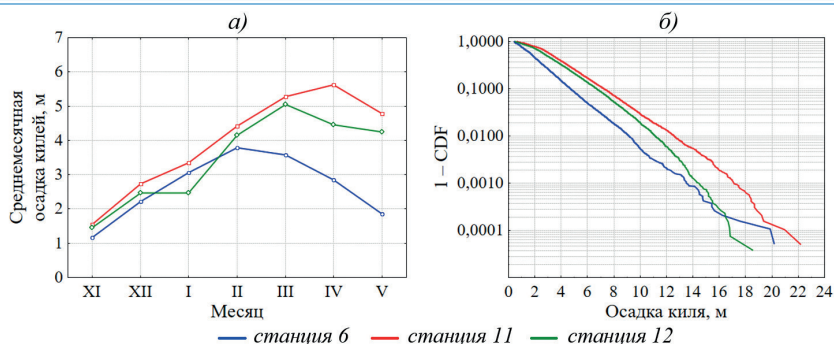


Рис. 12. Среднемесячные значения (а) и распределение значений (б) осадки килей торосистых образований по данным ледового сезона 2018/19 г.

Fig. 12. Mean monthly values (a) and the distribution of the draft values (б) of ice ridge keels according to the data of the entire ice season 2018/2019

Функции распределения для станций за весь ледовый сезон представлены на рис. 13.

Сравнение распределений для всего сезона критериями однородности показало значимость различий для всех пар станций, что в принципе видно и визуально.

Дисперсионный анализ сезонных серий для станций 6, 11 и 12 показал, что в целом за сезон 2018/19 г. наибольшее различие наблюдалось между станциями 6 и 12, наименьшее — между станциями 11 и 12.

Функция распределения имеет выраженный сезонный ход, который проявляется, пожалуй, больше, чем в предшествующие сезоны (рис. 13).

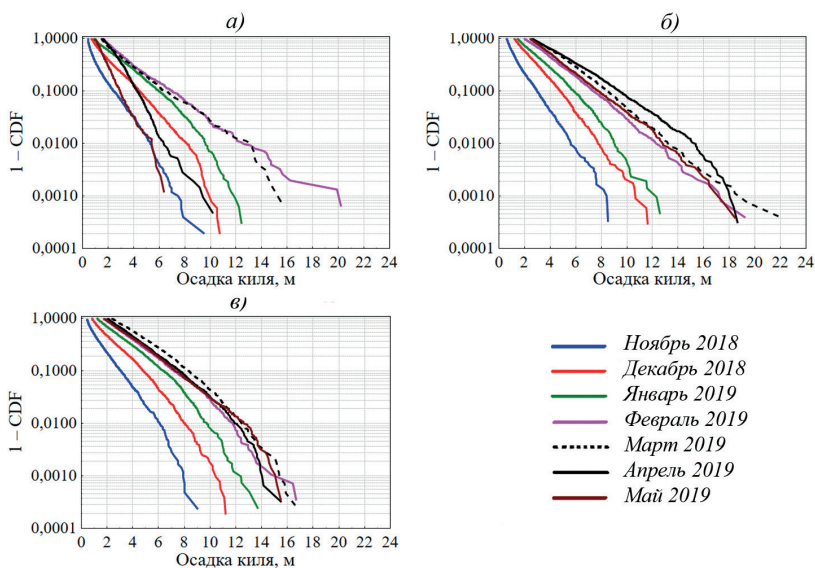


Рис. 13. Функции распределения осадок килей торосистых образований по станциям 6 (а), 11 (б) и 12 (в) в течение ледового сезона 2018/19 г.

Fig. 13. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by stations 6 (a), 11 (б) and 12 (в) during the ice season 2018/2019

Применение критериев Тьюки и Левене для месячных выборок (в данном сезоне получено по 7 месячных серий на каждой из 3 станций) показало, что:

– в средних значениях: различия между всеми парами месячных выборок на станциях являются значимыми, за исключением пары станций 11–12 для марта (в этом отличие данного сезона от сезонов, рассмотренных ранее);

– в дисперсиях: в первой половине сезона (январь) для станций 6–12 различия незначимы; в феврале различия незначимы для всех рассматриваемых станций; в марте по дисперсии неразличима пара станций 11–12.

На рис. 14 представлено распределение осадки килей торосов по месяцам на различных станциях.

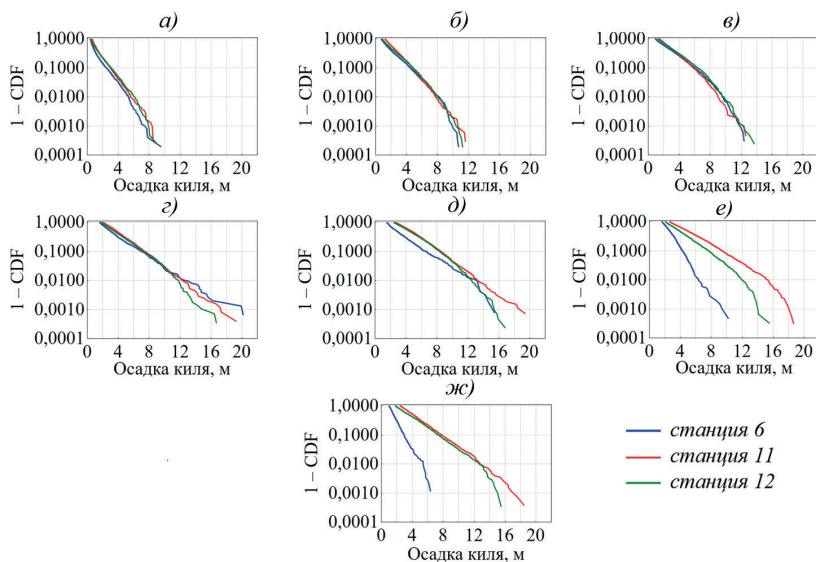


Рис. 14. Распределение осадки килей торосистых образований по месяцам в течение ледового сезона 2018/19 г.:

а) — ноябрь 2018 г., б) — декабрь 2018 г., в) — январь 2019 г., г) — февраль 2019 г., д) — март 2019 г., е) — апрель 2019 г., ж) — май 2019 г.

Fig. 14. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by months during the ice season 2014/2015
а) — November, 2018, б) — December, 2018, в) — January, 2019, г) — February, 2019, д) — March, 2019, е) — April, 2019, ж) — May, 2019

Обобщенные результаты сравнения месячных серий наблюдений за осадкой торосистых образований с использованием статистических критериев, учитывающих разные объемы исследуемых выборок, представлены в табл. 5.

В отличие от предшествующих сезонов, в 2018/19 г. наблюдается ярко выраженное отличие функции распределения месячных серий осадки килей торосов на различных станциях начиная с марта. В мае различия между станциями 6 и 11 достигают больших значений. Можно отметить, что количество данных в мае на станции 6 в 3 раза меньше, чем на станциях 11 и 12. Логично, что и критерии сравнения показали значимые различия для всех пар станций для всех месячных серий.

По результатам анализа данных однородность месячных выборок по средним значениям для данного сезона проявилась лишь для станций 11 и 12 в январе.

Однородность дисперсий проявляется в большей степени: в феврале, например, станции неразличимы по дисперсии.

Месяцы с незначимыми различиями по месячным сериям, полученным на станциях 6, 11, 12 в ледовом сезоне 2018/19 г.

Table 5

Months with insignificant differences in the monthly series received at stations 6, 11, 12 in the 2018/2019 ice season

Пары станций	Сравнение средних	Сравнение дисперсий	Сравнение распределений
6–11	–	II	–
6–12	–	I, II	–
11–12	I	II, III	–

Распределения выборок осадки килей по месяцам во всех случаях имеют значимые различия.

ВЫВОДЫ

Обобщая результаты анализа данных по осадкам килей торосистых образований, полученных в период с 2014 по 2017 г. и в ледовом сезоне 2018/19 г., можем сформулировать следующие выводы.

Ледовые условия в точках наблюдения в течение каждого ледового сезона были практически одинаковыми, за исключением станции 13, где наблюдался более толстый лед за счет, в первую очередь, ее более северного, по сравнению с остальными станциями, положения. Небольшие различия между ледовыми сезонами, во время которых на акватории моря Лаптевых работали ПАБС, позволяющие разделить их на 2 группы (2014/15, 2018/19 гг. и 2015/16, 2016/17 гг.), наблюдались в период с ноября по март; в период максимального развития ледяного покрова (апрель–май) различия практически исчезли.

Анализ данных с помощью статистических критериев проверки гипотез об однородности выборок приводит к заключению, что между станциями в целом наблюдаются различия по осадке килей торосов даже в сезоны со схожими ледовыми условиями.

Сильнее всего пространственные различия на протяжении всего ледового сезона проявились между станциями 6 и 11 в сезон 2016/17 г., в то время как в начале сезона различия на этих станциях проявились менее всего.

В целом схожесть оценок осадки льда наблюдается в основном в начале ледового сезона, в момент, когда ледовые условия на всех станциях достаточно схожи. При этом в начале сезона длина ледовых профилей на различных станциях различалась меньше, чем в середине и, особенно, в конце ледового сезона.

В середине ледового сезона скорость дрейфа, и, соответственно, протяженность профилей уменьшалась. В конце ледового сезона заметно увеличивалась скорость дрейфа ледяного покрова.

Условия дрейфа влияют на параметры осадки килей ледяных образований, по нашему мнению, в большей степени, чем ледовые условия. Исключения могут быть лишь в случае большого расстояния между станциями. Хотя анализ различий характеристик килей на станциях 12 и 13 (максимально удаленные друг от друга точки) показывает их схожесть для начала ледового сезона.

В целом анализ собранных с помощью ПАБС данных об осадке льда показал, что станции 11, 12 и 13 можно назвать ключевыми точками, описывающими пространственную изменчивость осадки килей торосистых образований для всех

ледовых сезонов. Данные, полученные на станциях 4 и 6, не вносят практически ничего в пространственную изменчивость.

Расстояния между станциями напрямую не влияют на величину различия в осадке килей торосистых образований. Расстояния критерия Колмогорова–Смирнова, выбранные как критерий различия в многомерном шкалировании, адекватно описывают пространственные различия осадки килей торосов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работы выполнены в рамках договоров № 100015/05937Д, № 100016/04690Д, № 100017/05003Д между ФГБУ «ААНИИ» и ОАО «НК «Роснефть» в 2015–2017 гг., а также договора № 04-2019ПР ФГБУ «ААНИИ» и ООО «Арктический Научный Центр» в 2019 г. в рамках проекта «Проведение гидрометеорологических исследований на шельфе морей Карского и Лаптевых».

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The work was carried out within the framework of contracts № 100015/05937D, № 100016/04690D, № 100017/05003D and № 04-2019PR between FSBI “AARI” and Rosneft 2015–2017 and 2019 within the framework of the project “Hydrometeorological research on the shelf of the Kara and Laptev seas”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецова О.А., Онищенко Д.А., Архипов В.В., Годецкий С.В. Ледовые условия восточного шельфа по данным акустических профилографов // *Neftegaz.RU*. 2020. URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/arktika/639067-ledovye-usloviya-vostochnogo-shelfa-po-dannym-akusticheskikh-profilografov/> (дата обращения: 10.11.2022).
2. Krishfield R.A., Proshutinsky A., Tateyama K., Williams W.J., Carmack E.C., McLaughlin F.A., Timmermans M.L. Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2014. V. 119 (2). P. 1271–1305.
3. Naumov A.K., Skutina E.A., Kubyshkin N.V., Kornishin K.A., Tarasov P.A., Efimov Ya.O. Comparative analysis of the hummock keel drafts in the Kara Sea, Laptev Sea and Chukchi Sea according to the data obtained from bottom sonars // *Proceedings of the Thirtieth (2020) International Ocean and Polar Engineering Conference Shanghai, China, October 11–16, 2020 Copyright © 2020 by the International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE)*. V. 1. P. 773–780.
4. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
5. Лемешко Б.Ю. Критерии проверки гипотез об однородности: Руководство по применению. Москва: НИЦ ИНФРА-М, 2021. 249 с.
6. Лемешко Б.Ю., Веретельникова И.В. Мощность к-выборочных критериев проверки однородности законов // *Измерительная техника*. 2018. № 7. С. 3–7.
7. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Веретельникова И.В. О применении критериев проверки однородности законов распределения // *Вестник Томского университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2017. № 41. С. 24–31.
8. Орлов А.И. О проверке однородности двух независимых выборок // *Заводская лаборатория*. 2003. Т. 69. № 1. С. 55–60.
9. Орлов А.И. Проверка статистической гипотезы однородности математических ожиданий двух независимых выборок: критерий Крамера–Уэлча вместо критерия Стьюдента // *Научный журнал КубГАУ*. 2015. № 110 (06). С. 1–22.
10. Орлов А.И. Состоятельные критерии проверки абсолютной однородности независимых выборок // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78. № 11. С. 66–70.

11. Холлендер М., Вулф Д. Непараметрические методы статистики. Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1983. 520 с.
12. Levene H. Robust tests for equality of variances // I. Olkin and others (eds.). Contributions to probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling. Stanford: Stanford University Press, 1960. P. 278–292.
13. Номенклатура морских льдов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 75 с.

REFERENCES

1. Kuznetsova O.A., Onishchenko D.A., Arkhipov V.V., Godetskii S.V. *Ledovye usloviia vostochnogo shel'fa po dannym akusticheskikh profilografov*. Ice conditions of the eastern shelf according to acoustic profilers. Neftegaz.RU. 2020. Available at: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/arktika/639067-ledovye-usloviya-vostochnogo-shelfa-po-dannym-akusticheskikh-profilografov/> (accessed: 10.11.2022). [In Russian].
2. Krishfield R.A., Proshutinsky A., Tateyama K., Williams W.J., Carmack E.C., McLaughlin F.A., Timmermans M. L. Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2014, 119 (2): 1271–1305.
3. Naumov A.K., Skutina E.A., Kubyshkin N.V., Kornishin K.A., Tarasov P.A., Efimov Ya.O. Comparative analysis of the hummock keel drafts in the Kara Sea, Laptev Sea and Chukchi Sea according to the data obtained from bottom sonars. *Proceedings of the Thirtieth (2020) International Ocean and Polar Engineering Conference Shanghai, China, October 11–16, 2020*. 2020, 1: 773–780.
4. Kobzar 'A.I. *Prikladnaia matematicheskaia statistika dlia inzhenerov i nauchnykh rabotnikov*. Applied mathematical statistics for engineers and researchers. Moscow: FIZMATLIT, 2006: 816 p. [In Russian].
5. Lemeshko B.Iu. *Kriterii proverki gipotez ob odnorodnosti. Rukovodstvo po primeneniiu*. Criteria for testing hypotheses about homogeneity. Application Guide. Moscow: SIC INFRA-M, 2018: 249 p. [In Russian].
6. Lemeshko B.Iu., Veretel'nikova I.V. The power of k-sample criteria for checking the uniformity of laws. *Izmeritel'naia tekhnika*. Measuring equipment. 2018, 7: 3–7. [In Russian].
7. Lemeshko B.Iu., Lemeshko S.B., Veretel'nikova I.V. On the application of criteria for checking the uniformity of distribution laws. *Vestnik Tomskogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika*. Bulletin of Tomsk University. Management, computer engineering and computer science. 2017, 41: 24–31. [In Russian].
8. Orlov A.I. On checking the uniformity of two independent samples. *Zavodskaiia laboratoriiia*. Factory laboratory. 2003, 69 (1): 55–60. [In Russian].
9. Orlov A.I. Verification of the statistical hypothesis of the uniformity of mathematical expectations of two independent samples: the Kramer-Welch criterion instead of the Student criterion. *Nauchnyi zhurnal KubGAU*. Scientific Journal of the Kuban State University. 2015, 110 (06): 1–22. [In Russian].
10. Orlov A.I. Consistent criteria for checking the absolute uniformity of independent samples. *Zavodskaiia laboratoriiia. Diagnostika materialov*. Factory Laboratory. Diagnostics of materials. 2012, 78 (11): 66–70. [In Russian].
11. Kholender M., Vulf D. *Neparamtricheskie metody statistiki*. Nonparametric methods of statistics. Moscow: *Finansy i statistika*, 1983: 520 p. [In Russian].
12. Levene H. Robust tests for equality of variances. I. Olkin and others (eds.). Contributions to probability and Statistics. Essays in Honor of Harold Hotelling. Stanford: Stanford University Press, 1960: 278–292.
13. *Nomenklatura morskikh l'dov*. Nomenclature of sea ice. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974: 75 p. [In Russian].