

Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.326.3(98)

doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-543-552

Протяжённость крупных разрывов в дрейфующем льду приатлантической части Арктического бассейна по данным снимков ИСЗ

© 2017 г. С.М. Лосев, Л.Н. Дымент*, Е.У. Миронов

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*ldyment@yandex.ru

Length of large leads in drifting ice of the sub-Atlantic part of the Arctic Basin with the use of satellite images

S.M. Losev, L.N. Dymment*, Ye.U. Mironov

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*ldyment@yandex.ru

Received February 20, 2017

Accepted April 21, 2017

Key words: average length of leads, fluctuations of the lead length, leads in the ice cover, relative length of leads.

Summary

Data on the extent of the large discontinuities of drifting ice in the Western part of the Arctic basin are analyzed for the period from October 2005 to September 2012. The data were obtained as a result of decoding the low resolution images received from the NOAA satellites. Areas with the low, medium and high lengths of the leads were isolated. It was found that, during the entire ice cycle, areas with low lengths (less than 100 km) were the most numerous. Definite seasonal as well as inter-annual variations were also determined in the changes of repeatability of the lead lengths in the ice cover, its relative value and the average values. They are manifested in changes of the mentioned parameters being calculated for both, the whole set of leads, and separately from data within each of the isolated areas. The seasonal variations of these parameters are shown to be consistent with the well-known intra-annual changes in the state of drifting ice, consisting in the development of the process of ice formation from October to March, and the subsequent destruction of the ice fields in April–June. Fluctuations with duration up to five years were revealed within the inter-annual changes of characteristics of the lengths of leads. The presence of these inter-annual changes may be explained by the development of the processes leading to «weakening» of drifting ice during the period under consideration. The assumption that the fluctuations in the length of discontinuities of the ice were related to the changes of the rate of the ice drift is grounded.

Citation: Losev S.M., Dymment L.N., Mironov Ye.U. Length of large leads in drifting ice of the sub-Atlantic part of the Arctic Basin with the use of satellite images. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017. 57 (4): 543–552. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-543-552

Поступила 20 февраля 2017 г.

Принята к печати 21 апреля 2017 г.

Ключевые слова: колебания протяжённости разрывов, относительная протяжённость разрывов, разрывы в ледяном покрове, средняя протяжённость разрывов.

Исследуется протяжённость крупных нарушений сплошности дрейфующего льда в западной части Арктического бассейна с октября 2005 по сентябрь 2012 г. на основе дешифрирования снимков малого разрешения с искусственных спутников Земли (NOAA). Отмечены сезонные и межгодовые вариации в изменениях повторяемости протяжённости разрывов в ледяном покрове, её относительной величины и средних значений. Наличие межгодовых колебаний объясняется развитием процессов, вызывающих «ослабление» дрейфующего льда и предположительно связанных с изменениями скорости дрейфа льда.

Введение

В Арктическом бассейне и арктических морях в холодный период года в сплочённом дрейфующем льду постоянно присутствуют нарушения его сплошности, которые представлены трещинами,

каналами и цепочками вытянутых, сравнительно узких разводий. Нарушения сплошности льда нередко называют разрывами, поскольку зимой их образование обусловлено исключительно динамическими причинами. Вновь возникающие разрывы довольно быстро покрываются ниласом, а

затем молодым льдом. Интерес к изучению нарушений сплошности льда вызван как научной, так и практической их значимостью.

Приведём несколько примеров её проявления: 1) в зимнее время из Арктического бассейна через разрывы, площадь которых составляет всего около 3% общей площади ледяного покрова, в атмосферу поступает столько же тепла, сколько через весь многолетний лёд [1]; 2) разрывы — один из элементов ландшафта ледяного покрова [2]; 3) присутствие каналов и разводий в сплочённом льду поддерживает жизнедеятельность морских млекопитающих [3]; 4) образование определённым образом упорядоченных систем нарушений сплошности влияет на состояние самого ледяного покрова, формируя его блоковое макростроение [4]; 5) климатические данные о нарушениях сплошности льда учитываются при планировании морских операций в холодное время года [5–8], а использование оперативной информации о разрывах способствует успешной реализации плавания современных судов в сплочённом льду даже без ледокольного обеспечения [9, 10].

Исходные данные

Использованная в настоящей работе исходная информация о разрывах получена путём оцифровки нарушений на снимках малого разрешения, поступающих в режиме непосредственной передачи с искусственных спутников Земли (ИСЗ) NOAA в ИК-диапазоне. Пороговая ширина каналов, дешифрируемых на таких снимках, — 500 м [11]. В связи с этим полученная информация о протяжённости и ориентации относится только к крупным разрывам. Совокупная протяжённость каналов шириной более 500 м, согласно данным, полученным по материалам съёмки, выполненных с самолёта радаром бокового обзора на полигоне 180×240 км при разрешении снимков 40 м, составляет только 6% общей протяжённости всех разрывов [12]. Однако существуют задачи, для решения которых необходим учёт разрывов с шириной более 500 м. Отметим, что модальная ориентация крупных каналов практически совпадает с модальной ориентацией, рассчитанной по их совокупности [12].

Созданный электронный архив содержит географические координаты точек, ограничи-

вающих концы относительно прямолинейных участков разрывов, где ориентация канала изменяется не более чем на 10° . Чем больше извилистость разрыва, тем меньше расстояние между граничными точками, а следовательно, и протяжённость отрезка. По данным электронного архива рассчитываются протяжённость и ориентация отрезков разрывов, а также протяжённость и результирующее направление каждого разрыва в целом. Информация о координатах концов всех отрезков разрывов в регионе, полученных со снимков ИСЗ на конкретную дату, принята в качестве исходных данных одного наблюдения. За рассматриваемый временной интервал все данные осреднялись за суточный период. В некоторые дни дешифрирование разрывов на снимках было невозможно из-за облачности, поэтому число наблюдений оказалось меньше календарного числа дней в году в среднем на 35%.

Нарушения сплочённости льда анализируются в пределах акватории (рис. 1), восточной границей которой служит меридиан 110° в.д., западной — меридиан 80° з.д., южной — северные берега архипелагов Северная Земля, Земля Франца-Иосифа, Шпицберген и северный берег Гренландии, а в проходах между ними — приблизительно параллель 80° с.ш. В работе исследуется только одна характеристика нарушений сплошности льда — протяжённость разрывов. Показатели их направления и плотности [13] здесь не рассматриваются. Протяжённость нарушений сплошности льда рассчитана по исходным данным за семь лет (2005–2012 гг.) с октября по июнь для каждого годового ледового цикла. В июле–сентябре разрывы в исследуемом районе иногда также встречались на снимках ИСЗ в зоне льда сплочённостью 10 баллов, однако общее их число было крайне мало и не позволило достоверно вычислить их статистические параметры.

Результаты и их обсуждение

Значения протяжённости разрывов f в зимний период определялись в рамках всей акватории без выделения отдельных локальных зон. Общее число наблюдений за семь лет с установленной протяжённостью всех нарушений сплошности ледяного покрова, выявленных на снимках ИСЗ, — 1334 (табл. 1). В среднем это соответству-

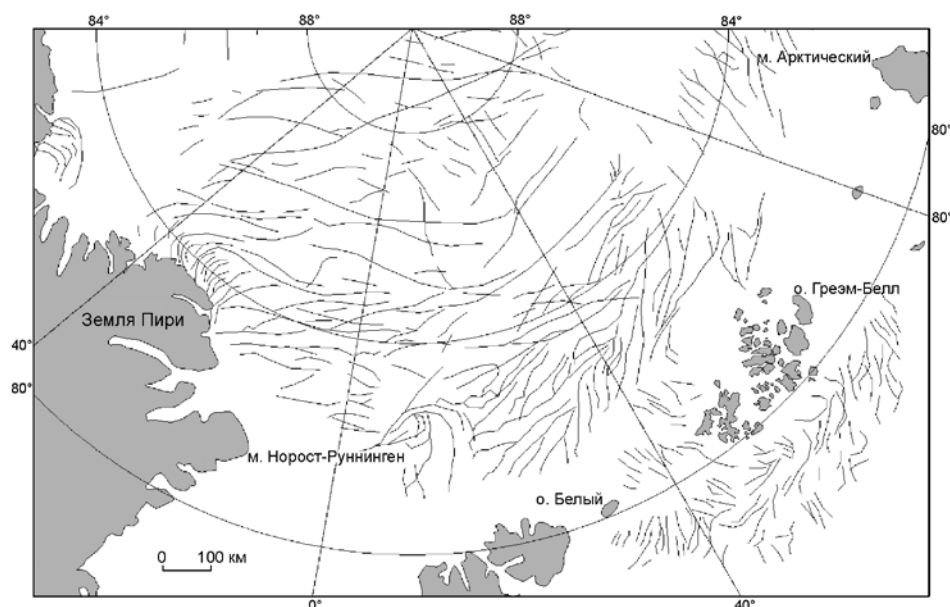


Рис. 1. Нарушения сплошности льда одного наблюдения в пределах исследуемого региона по результатам оцифровки их на снимках ИСЗ NOAA за 23 января 2008 г.

Fig. 1. Ice cover discontinuities of one observation within the study region from the results of their digitizing on NOAA images for 23 January 2008

Таблица 1. Распределение разрывов по протяжённости в дрейфующем льду и их статистические характеристики, обобщённые за каждый месяц в период 2006–2012 гг., %

Протяжённость, км	Месяцы (число наблюдений)									
	X (152)	XI (147)	XII (162)	I (154)	II (146)	III (168)	IV (164)	V (148)	VI (122)	X–VI (1334)
	Число зафиксированных разрывов									
	16 701	23 689	22 322	20 202	19 454	23 061	20 671	13 756	10 390	168 709
0–50	51,2	40,4	35,2	35,0	34,8	31,7	37,4	47,3	52,3	40,2
50–100	33,2	36,4	37,3	37,1	36,9	34,9	35,8	34,6	31,5	35,5
100–150	9,6	12,9	14,6	14,6	14,7	15,5	13,3	10,9	9,8	12,9
150–200	3,4	5,5	6,3	6,3	6,3	7,9	6,2	4,0	3,5	5,6
200–250	1,4	2,5	3,1	3,1	3,2	4,1	3,4	1,6	1,5	2,7
250–300	0,6	1,2	1,6	1,6	1,7	2,2	1,6	0,8	0,7	1,3
300–350	0,2	0,5	0,8	0,9	0,9	1,5	0,9	0,4	0,4	0,7
350–400	0,2	0,3	0,5	0,6	0,6	0,9	0,5	0,1	0,1	0,4
400–450	0,0	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,3	0,1	0,0	0,2
450–500	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,1	0,1	0,2
> 500	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5	0,3	0,0	0,0	0,2
Максимальная, км	766	683	794	770	796	1252	1029	573	572	1252
Средняя \bar{f} , м	64	77	85	87	88	98	85	68	63	80
Стандартное отклонение, км	51	62	71	72	74	87	74	54	53	69

ет 191 наблюдению за девять месяцев, составляющих часть годового ледового цикла, или 21 наблюдению в месяц. За тот же период оцифровано более 168 тыс. разрывов. Анализ табл. 1 показывает, что в изучаемой части Арктического бассейна в октябре–феврале протяжённость разрывов колеблется от 10 до 800 км. В марте и апреле её максимальные значения f_{\max} достигают 1000–1200 км. Далее величина f_{\max} снова понижается и в мае и июне составляет 570 км. Месячные значения повторяемости протяжённости разрывов P с

ростом f уменьшаются, начиная со второго интервала градаций их протяжённости в декабре–марте и с первого интервала – в остальные месяцы (см. табл. 1). В октябре и июне число разрывов протяжённостью $f \geq 400$ км невелико.

Средние месячные значения протяжённости разрывов \bar{f} , приведённые в нижней части табл. 1, имеют хорошо выраженный сезонный ход изменения. В октябре средняя длина нарушений сплошности составляет 64 км. Далее она увеличивается и в марте достигает максимума –

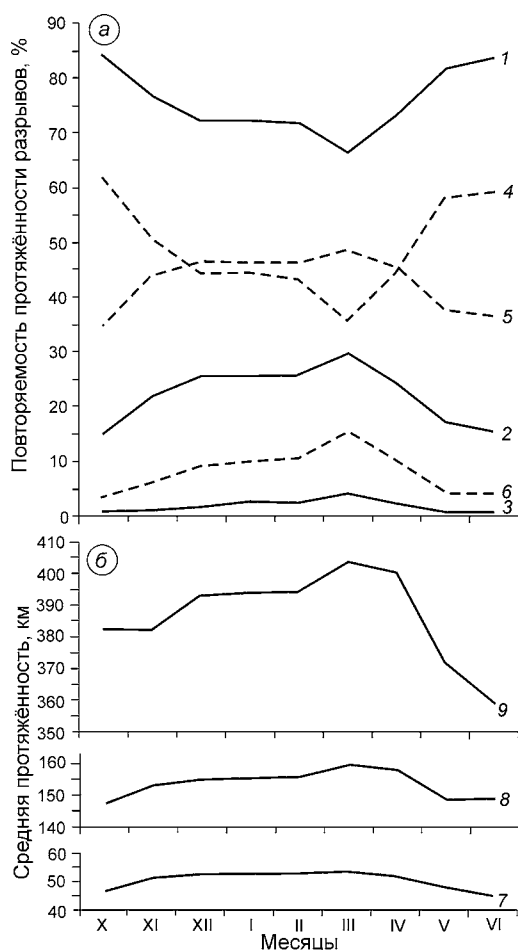


Рис. 2. Сезонное изменение повторяемости протяжённости разрывов, их относительной протяжённости (а) и средней месячной протяжённости (б) в выделенных группах:

1, 2, 3 – повторяемость протяжённости в группах I, II, III соответственно; 4, 5, 6 – относительная протяжённость в группах I, II, III соответственно; 7, 8, 9 – средняя протяжённость в группах I, II, III соответственно

Fig. 2. Seasonal change of recurrence of the length of leads, their relative length (a) and mean monthly length (b) in the identified groups:

1, 2, 3 – recurrence of the length of leads in groups I, II, III respectively; 4, 5, 6 – relative length of leads in groups I, II, III respectively; 7, 8, 9 – average length of leads in groups I, II, III respectively

98 км. Затем значения \bar{f} уменьшаются и в июне средняя протяжённость становится практически равной её начальной величине. Стандартное отклонение длины разрывов σ_f непосредственно связано с её средним значением \bar{f} . Линейная корреляция этих величин характеризуется довольно большим коэффициентом – 0,97, а связь между ними определяется выражением $\sigma_f = 0,843\bar{f}$. Таким образом, относительная из-

Таблица 2. Статистические параметры протяжённости разрывов, обобщённые по выделенным группам

Группа разрывов по протяжённости	Совокупная повторяемость протяжённости разрывов P , %	Средняя протяжённость разрывов \bar{f} , км	Стандартное отклонение σ_f , км	Относительная протяжённость f^* , %
I	75,8	50,4	19,0	47,6
II	22,5	154,7	45,7	43,7
III	1,7	394,2	89,2	8,7

менчивость протяжённости нарушений сплошности, характеризуемая коэффициентом вариации $k = \sigma_f / \bar{f}$, с октября по июнь практически не изменяется. Сезонные различия проявляются и в повторяемости протяжённости разрывов. Чтобы получить о них достаточно полное представление, проанализируем совокупные значения месячной повторяемости, вычисленные для трёх групп разрывов разной протяжённости.

Первая группа (I) объединяет разрывы, протяжённость которых $f < 100$ км. Будем считать её группой разрывов пониженной протяжённости. Она – самая многочисленная. Для большинства месяцев повторяемость в обоих интервалах длины, относящихся к этой группе, имеет близкие значения, а величина их суммарной повторяемости превышает 66%. Сезонный ход изменения повторяемости длины разрывов рассматриваемой группы (рис. 2) характеризуется её уменьшением с 84% в октябре до 67% в марте. После этого минимума повторяемость протяжённости разрывов увеличивается и в июне достигает начальной величины. Общая повторяемость протяжённости разрывов первой группы за весь период составляет 76% (табл. 2). Сезонное изменение среднемесячной протяжённости нарушений сплошности данной группы подобно описанному ранее изменению значений \bar{f} , осреднённых за каждый месяц по всей совокупности данных. Самые низкие значения средней длины здесь также отмечаются в октябре (46,6 км) и июне (44,8 км), а максимальные (53,3 км) – в марте. Осреднённая за девять месяцев протяжённость разрывов первой группы равна 50,4 км. В то же время ход изменения средней протяжённости разрывов противоположен ходу изменения её повторяемости.

Ко *второй группе (II)* отнесены разрывы средней протяжённости – $100 \leq f < 300$ км. При переходе от первой ко второй группе повторяемость

протяжённости уменьшается более чем в 2,5 раза. В пределах второй группы значения повторяемости протяжённости разрывов варьируют от 0,6 до 15,5% (см. табл. 1). Сезонный ход изменения совокупной месячной повторяемости протяжённости противоположен ходу её изменения в первой группе. Совокупная повторяемость сначала увеличивается с 15% в октябре до 30% в марте, а затем уменьшается до 15,5% в июне. Обобщённая за все месяцы повторяемость протяжённости разрывов составляет 22,5%. Среднемесячная протяжённость нарушений сплошности с октября по июнь изменяется аналогично повторяемости. В октябре она составляет 147,4 км, а к марту возрастает до 159,8 км, затем происходит её снижение, и в июне она равна 149,1 км.

В *третью группу* (III) включены разрывы повышенной протяжённости — $f \geq 300$ км. Месячная её повторяемость в интервалах протяжённости составляет в основном 0,1–0,9%, и только один раз она достигает 1,5%. Тем не менее, сезонный ход совокупной повторяемости, обобщённой за каждый месяц по её интервалам, проявляется здесь не менее отчётливо, чем во второй группе. Сохраняется и направленность сезонного изменения значений повторяемости протяжённости разрывов (см. рис. 2). В осенне-зимний период повторяемость протяжённости сначала увеличивается с 0,5% в октябре до 3,8% в марте, а затем в зимне-весенний период уменьшается, и в июне её величина равна 0,6%. Общая повторяемость протяжённости разрывов, обобщённая за девять месяцев, составляет 1,7%, т.е. группа повышенной протяжённости разрывов — самая малочисленная. Направленность сезонного изменения среднемесячной протяжённости разрывов этой группы аналогична направленности её изменения в двух предшествующих группах. Однако по сравнению с ними различия значений \bar{f} здесь самые большие. В октябре средняя многолетняя протяжённость разрывов составляет 382 км, в марте — 403,5 км, в июне — 358 км. Обобщённый за все месяцы этот параметр равен 394 км, что в 2,5 раза больше по сравнению со второй группой и в 7,8 раза больше — с первой.

Поскольку с увеличением протяжённости разрывов их повторяемость уменьшается, а средняя протяжённость, наоборот, возрастает, выясним, как при этом изменяется относительная протяжённость разрывов f^* , определяемая выражением

$$f^* = \frac{\sum_{i=1}^m f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} 100\%,$$

где m — число разрывов в рамках выделенной группы за конкретный месяц; n — общее их число за тот же месяц.

Относительная протяжённость разрывов представляет собой долю суммарной протяжённости некоторой совокупности с заданными значениями f от общей длины всех нарушений сплошности, поэтому, по аналогии с повторяемостью, определяемой по числу случаев, её можно считать геометрической повторяемостью. По результатам расчёта этого параметра на рис. 2 воспроизведены кривые его сезонного хода. Они показаны в сопоставлении с уже рассмотренными кривыми изменения повторяемости протяжённости нарушений сплошности льда. Видно, что кривые относительной протяжённости разрывов расположены значительно компактнее по сравнению с кривыми повторяемости. Сезонные изменения f^* в каждой группе разрывов подобны изменениям повторяемости протяжённости разрывов P . Это позволяет, не останавливаясь на них, сразу обратиться к различиям, которые проявляются в рамках каждой группы между значениями f^* и P .

Из сопоставления кривых 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6 (см. рис. 2, а) следует, что в первой группе разрывов их относительная длина существенно меньше повторяемости. Значения f^* и P , обобщённые за все месяцы (см. табл. 2), различаются в 1,6 раза. Во второй группе величина f^* превышает значение P . Обобщённые средние месячные значения этих параметров различаются в 1,9 раза. В декабре относительная протяжённость разрывов второй группы достигает значений первой и до марта даже несколько превышает её. В третьей группе, как и во второй, относительная протяжённость разрывов больше повторяемости их протяжённости. При этом ход сезонного изменения f^* выражен более чётко по сравнению с ходом изменения P . Особенно хорошо выделяется мартовский максимум со значением $f^* = 15,5\%$, что в четыре раза больше максимума повторяемости. Обобщённая по данным третьей группы за все месяцы величина f^* равна 8,7%, т.е. в пять раз больше повторяемости, обобщённой за тот же период.

Таким образом, если повторяемость протяжённости разрывов, рассчитанная по числу случаев, в первой и второй группах с декабря по апрель различается на 37–50%, а в октябре–декабре и мае–июне эти различия превышают 60%, то разность значений геометрической повторяемости в этих группах за те же промежутки времени составляет соответственно 2–12% и менее 27%. Различия между значениями геометрической повторяемости протяжённости нарушений сплошности первой и третьей групп также существенно меньше, чем между значениями общепринятой повторяемости. Однако разность геометрической повторяемости протяжённости разрывов второй и третьей групп несколько больше разности общепринятой повторяемости.

Изменения обоих параметров в совокупности дают полное представление о сезонном изменении протяжённости разрывов. На практике эти параметры в зависимости от решаемой задачи могут учитываться как совместно, так и порознь. Например, при планировании морских операций в сложных ледовых условиях для оценки возможности использования попутных разрывов [7, 8], наряду с учётом их климатической модальной ориентации, во внимание принимается также обеспеченность модального интервала. Её целесообразно определять как по повторяемости разрывов, направление которых попадает в этот интервал, так и по их относительной протяжённости. Однако при принятии решения предпочтение отдаётся более значимому в данном случае второму показателю.

Полученные результаты убеждают, что сезонные изменения протяжённости разрывов связаны с изменением состояния самого дрейфующего льда. В начале годового ледового цикла, когда после летнего таяния и разрушения остаточный лёд довольно раздроблен [14], а вновь образовавшийся лёд ещё весьма тонкий и непрочный, число разрывов небольшой протяжённости особенно велико. Число нарушений сплошности средней протяжённости в это время, наоборот, понижено, а разрывов повышенной протяжённости — совсем мало. По мере того, как в результате усиления процесса ледообразования увеличивается толщина нового льда, появляются обширные поля сморозей, а дрейфующий лёд становится более целостным и прочным, относительное количество разрывов пониженной протяжённо-

сти уменьшается, а средней и повышенной протяжённости — увеличивается. То же самое происходит и с относительной протяжённостью разрывов. В дрейфующем льду с увеличением его сплошности под действием внешних сил возникают внутренние напряжения [15, 16]. При достижении предельной прочности льда в нём образуются деформации сжатия и растяжения, сопровождающиеся формированием гряд торо-сов, а также трещин и каналов [17, 18].

Март — последний месяц усиления таких процессов. Именно в марте отмечаются максимальная протяжённость разрывов и наибольшее среднемесячное значение их длины. В это время на снимках ИСЗ нередко устанавливаются протяжённые разрывы, которые последовательно пересекают сначала зону однолетнего, а затем и многолетнего льда [19]. При этом не отмечается никакой тенденции обхода разрывами участков с более толстым льдом. В апреле под влиянием солнечной радиации температура льда постепенно повышается, а прочность снижается. Поля сморозей начинают распадаться на части. В мае этот процесс усиливается и раздробленность льда возрастает [14]. Условия для образования непрерывных протяжённых разрывов исчезают. В результате число нарушений сплошности пониженной протяжённости возрастает, и в июне показатели протяжённости оказываются такими же, как и в октябре.

Перейдём к анализу *межгодовых изменений* протяжённости разрывов. Однако на основе семилетнего ряда данных, который есть в нашем распоряжении, невозможно в полной мере выявить все аспекты многолетней изменчивости этого элемента. Остановимся только на тех из них, по которым удалось получить некоторые результаты. В табл. 3 для каждого годового ледового цикла представлены те же показатели, которые использовались при анализе сезонной изменчивости протяжённости нарушений сплошности. Их межгодовые изменения также будем рассматривать по выделенным трём группам (рис. 3). Из приведённых на рис. 3 кривых следует, что в изменениях используемых показателей присутствуют колебания разной продолжительности, которые довольно чётко проявляются в изменении параметров P и f^* . В первой группе эти параметры за семилетний промежуток времени имеют по одному полному пятилетнему колебанию. Во второй группе отмечается по одному колебанию

Таблица 3. Распределения протяжённости разрывов в дрейфующем льду и её статистические характеристики, обобщённые за девятимесячные промежутки времени годовых ледовых циклов, %

Протяжённость, км	Годы (число наблюдений)						
	2005/06 (188)	2006/07 (183)	2007/08 (190)	2008/09 (188)	2009/10 (198)	2010/11 (190)	2011/12 (197)
	Число зафиксированных разрывов						
	13 354	22 691	27 271	32 752	31 338	28 111	13 192
0–50	31,1	29,8	38,6	46,9	43,9	40,3	44,6
50–100	36,9	39,9	36,3	32,1	34,0	36,2	35,0
100–150	15,7	15,6	13,2	11,0	12,3	12,8	11,7
150–200	7,3	7,1	5,8	4,8	5,0	5,4	4,7
200–250	3,9	3,4	2,8	2,4	2,4	2,5	1,9
250–300	2,0	1,8	1,5	1,1	1,0	1,3	1,0
300–350	1,2	1,0	0,8	0,6	0,6	0,7	0,4
350–400	0,7	0,6	0,4	0,4	0,3	0,4	0,2
400–450	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
450–500	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
> 500	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
Максимальная, км	1252	915	1029	970	959	749	794
Средняя \bar{f} , км	96	92	82	74	75	79	72
Стандартное отклонение, км	83	73	70	67	63	65	61

четырёхлетней продолжительности. При этом ход изменения параметров во второй группе противоположен их изменению в первой. В третьей группе достаточно хорошо проявляются только колебания относительной протяжённости разрывов. Продолжительность каждого из двух выделенных здесь колебаний составляет два года.

Средняя протяжённость разрывов первой и третьей групп имеет по одному полному четырёхлетнему колебанию, которые происходят в противоположных фазах. Во второй группе в слабых выраженных изменениях значений \bar{f} присутствуют два колебания: продолжительность первого — три года, второго — два года. Протяжённость нарушений сплошности, осреднённая за каждый год по всей совокупности данных, имеет одно хорошо выраженное четырёхлетнее колебание. Оно подобно колебанию \bar{f} в первой группе, несмотря на то, что в двух других группах они совершенно иные. Обусловлено это значительным преобладанием числа нарушений сплошности первой группы над их числом во второй и третьей группах.

Амплитуды колебаний повторяемости протяжённости разрывов A_p и их относительной длины A_{p*} в первой группе — самые большие (табл. 4). Во второй группе их значения несколько меньше, а в третьей настолько малы, что на рис. 3, а колебания параметров P и f^* трудно различимы. Амплитуда колебаний средней протяжённости разрывов $A_{\bar{f}}$ в третьей группе, наоборот, высокая, во

второй — минимальна, а в первой группе имеет промежуточную величину. Наибольшая амплитуда принадлежит четырёхлетнему колебанию средней протяжённости разрывов, вычисленной по всей совокупности данных.

Установленные межгодовые колебания параметров протяжённости разрывов продолжительностью от двух до пяти лет, вероятнее всего, связаны с межгодовыми изменениями интенсивности дрейфа льда. Ранее авторами данной работы было показано, что в зоне стресса трансарктического ледового потока, следующего от моря Бофорта через весь Арктический бассейн до пролива Фрама, удельная протяжённость разрывов, осреднённая по участкам стресса за годовые циклы, статистически связана со среднегодовой скоростью дрейфа льда на данных участках [20]. При этом скорость дрейфа на стрессе хорошо согласуется со средней годовой повторяемостью антициклонических круговоротов P_a в полях дрейфа льда в Арктическом бассейне. Чем больше величина P_a , тем интенсивнее дрейф в зонах стресса и в бассейне в целом, а следовательно, тем значительнее пространственные различия скорости перемещения льда и его деформации, сопровождающиеся образованием разрывов. В свою очередь в межгодовых изменениях P_a обнаружены колебания, продолжительность которых составляет от двух до шести лет. Этой продолжительности колебаний, как видим,

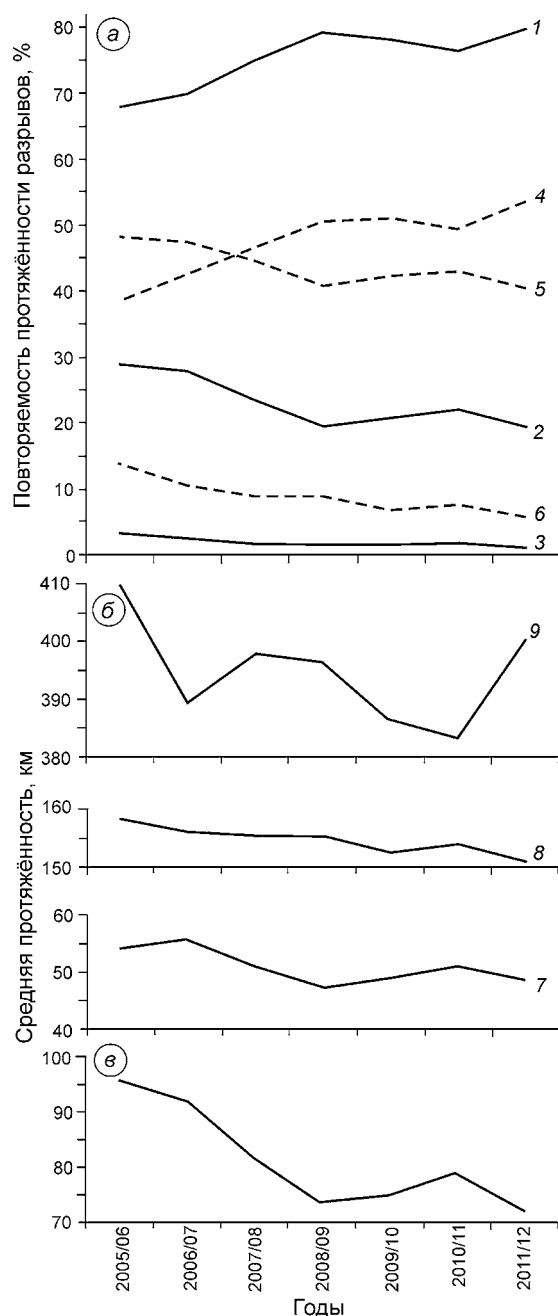


Рис. 3. Межгодовые изменения повторяемости протяжённости разрывов, их относительной протяжённости (а), средней месячной протяжённости в выделенных группах (б) и всей совокупности разрывов (в): 1, 2, 3 – повторяемость протяжённости в группах I, II, III соответственно; 4, 5, 6 – относительная протяжённость в группах I, II, III соответственно; 7, 8, 9 – средняя месячная протяжённость в группах I, II, III соответственно

Fig. 3. Interannual changes of recurrence of the length of leads, their relative length (a) and mean monthly length in the identified groups (b) and of the entire set of leads (v): 1, 2, 3 – recurrence of the length of leads in groups I, II, III respectively; 4, 5, 6 – relative length of leads in groups I, II, III respectively; 7, 8, 9 – average length of leads in groups I, II, III respectively

Таблица 4. Средние значения амплитуд колебания протяжённости разрывов

Группа разрывов по протяжённости	Амплитуда колебаний		
	повторяемости протяжённости $A_p, \%$	относительной протяжённости $A_{ps}, \%$	средней протяжённости $A_f, \text{км}$
I	7,8	5,5	6,3
II	5,6	4,3	1,7
III	0,6	1,4	9,7
I–III	Не вычисляются для совокупности разрывов		Согласно рис. 3, в – 11,6

соответствуют установленные колебания анализируемых показателей протяжённости разрывов. Однако окончательный вывод о природе колебаний данных показателей может быть сделан только при совместном анализе протяжённости разрывов и скорости дрейфа льда за более продолжительный период, превышающий используемый не менее чем в два раза.

В целом же все рассматриваемые изменения связаны с общей эволюцией состояния ледяного покрова. Известно, что в течение исследуемого периода в арктических морях и Арктическом бассейне ледяной покров сокращался. На это указывают следующие факты: 1) существенное сокращение площади, занятой старым льдом, и увеличение площади однолетнего льда; 2) рост числа снежниц и их размеров на дрейфующем льду летом; 3) увеличение площади зон очищения ото льда в летний период и соответственно уменьшение ледовитости; 4) смещение начала ледообразования осенью на более поздние сроки; 5) уменьшение размеров полей сморози дрейфующего льда в холодный период.

При такой эволюции ледяного покрова возрастает образование разрывов пониженной протяжённости, а разрывов средней и повышенной протяжённости – уменьшается. Соответственно уменьшается и средняя их длина. Именно такой ход взаимосвязанных процессов отмечался в годы, за которые выполнен анализ исходных данных.

Выводы

1. Количество разрывов пониженной протяжённости – длиной менее 100 км – доминирует во все месяцы с октября по июнь. Их месячная повторяемость не опускается ниже 67%, а сред-

нее значение за все месяцы равно 76%. Изменения показателей нарушений сплошности этой группы в значительной мере определяют их изменение в рамках всей совокупности разрывов.

2. В эволюции протяжённости крупных разрывов в пределах исследуемого региона хорошо выражены как сезонная, так и межгодовая изменчивость.

3. Сезонные изменения показателей протяжённости разрывов связаны с изменением состояния дрейфующего льда. В начале годового ледового цикла, когда остаточный лёд сильно раздроблен, а вновь образовавшийся лёд ещё весьма тонкий и непрочный, повторяемость разрывов протяжённостью менее 100 км особенно велика, а средняя протяжённость всей совокупности разрывов понижена. По мере развития процесса ледообразования повторяемость разрывов пониженной протяжённости уменьшается. В марте их количество минимально, а средняя протяжённость всей совокупности разрывов максимальна. В апреле—июне в связи с распадом полей сморозей льда, уменьшением его прочности и усилением разрушения число нарушений сплошности пониженной протяжённости снова увеличивается, а разрывов протяжённостью более 100 км уменьшается. Соответственно падает и средняя протяжённость общей совокупности всех разрывов.

4. В межгодовых изменениях всех показателей протяжённости нарушений сплошности от-

мечаются колебания продолжительностью от двух до пяти лет. Наиболее вероятная причина их существования — межгодовые изменения интенсивности перемещения льда, связанные с циклическими колебаниями повторяемости антициклонических вихревых образований в полях скорости его дрейфа.

Благодарности. Статья подготовлена по материалам работ, выполненных с помощью финансовой поддержки Министерства образования и науки Российской Федерации при проведении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по теме «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации» (Соглашение о предоставлении субсидии от 20.10.2014 № 14.610.21.0006, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61014X0006).

Acknowledgments. The article was prepared on the basis of materials on applied scientific studies and experimental developments. Funding for this research was provided by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Project RFMEFI61014X0006, Agreement No. 14.610.21.0006 «Development of new methods and techniques for monitoring of geophysical and hydrometeorological state of Spitsbergen and the Russian West Arctic».

Литература

1. *Макшtas А.П.* Тепловой баланс арктический льдов в зимний период. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 65 с.
2. *Дымент Л.Н.* Разрывы как элемент ландшафта дрейфующих льдов // Тр ААНИИ. 2001. Т. 443. С. 91–95.
3. *Горбунов Ю.А., Беликов С.Г., Шильников В.И.* Влияние ледовых условий на распространение и численность белого медведя в морях советской Арктики // Бюл. МОИП. Отдел биологии. 1987. Т. 92. Вып. 5. С. 19–28.
4. *Бородачев В.Е.* О блоковом строении ледяного покрова // Тр. ААНИИ. 1974. Т. 316. С. 25–27.
5. *Адамович Н.М.* Ледовые условия западного района советской Арктики в холодный период года и учет их влияния на судоходство: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Л.: ААНИИ, 1987. 18 с.
6. *Бресткин С.В., Горбунов Ю.А., Лосев С.М.* Ледовая информация как элемент обеспечения плава-

Reference

1. *Makshatas A.P.* Teplovoy balans arkticheskikh l'dov v zimniy period. Thermal balance of the Arctic ice in the winter period. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984: 65 p. [In Russian].
2. *Dymant L.N.* Leads as a landscape element of drifting ice. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 2001, 443: 91–95. [In Russian].
3. *Gorbunov Ju.A., Belikov S.G., Shilnikov V.I.* Influence of ice conditions on spreading and numbers of polar bear in the seas of the Russian Arctic. *Byulleten' Moskovskogo Obshchestva ispyateley prirody. Otdelenie biologii*. Bulletin of the Moscow Society of Nature Studies. Dept. of Biology. 1987, 92 (5): 19–28. [In Russian].
4. *Borodachev V.Ye.* On block structure of the ice cover. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1974, 316: 25–27. [In Russian].
5. *Adamovich N.M.* Ledovye usloviya zapadnogo rayona sovet-skoy Arktiki v holodnyi period goda i uchet ikh vliyaniya na sudokhodstvo. Ice conditions of the western region of the Soviet Arctic in the cold period of a year and account of their influence on shipping. PhD Thesis. Leningrad: AARI, 1987: 18 p. [In Russian].

- ния транспортных подводных лодок в Арктике // Материалы науч.-практич. конф. «Арктический мост». Архангельск, 1993. С. 58–61.
7. Brestkin S.V., Gorbunov Ju.A., Losev S.M. Results of statistical analysis of satellite data on leads in ice cover in the south-western Kara Sea and their passable use for planning sea operations during the winter-spring period // POAC'95 August 15–18 1995. Murmansk. St. Petersburg. 1995. V. 3. P. 60–68.
8. Gorbunov Ju.A., Diment L.N., Losev S.M. Taking into account generalized characteristics of leads in the ice cover for selecting the routes of ship escort by icebreakers // INSROP Working paper. 1996. № 68 (141). P. 10–20.
9. Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н., Лосев С.М. Средние многолетние характеристики крупных нарушений сплошности льда в Карском море и северо-восточной части Баренцева моря. СПб.: изд. ГНЦ РФ ААНИИ, 2014. 36 с.
10. Фролов С.В., Клячкин С.В. Учет влияния ориентации разрывов в ледяном покрове на скорость движения судна во льдах // Тр. ААНИИ. 2001. Т. 443. С. 103–111.
11. Бушув А.В. Развитие и совершенствование системы и методов ледовых наблюдений // Проблемы Арктики и Антарктики. 1991. Вып. 66. С. 170–183.
12. Лосев С.М., Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н. Оценка характеристик разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых по снимкам самолетного радиолокатора бокового обзора и снимкам спутников Земли «Метеор» и NOAA // Метеорология и гидрология. 2003. № 2. С. 59–67.
13. Лосев С.М., Горбунов Ю.А. Диагностика и среднесрочный прогноз нарушений сплошности морского ледяного покрова // Тр. ААНИИ. 1998. Т. 438. С. 13–25.
14. Горбунов Ю.А., Тимохов Л.А. Изменчивость раздробленности льдов // Тр. ААНИИ. 1973. Т. 316. С. 89–94.
15. Сухоруков К.К. О механизме формирования напряженного состояния морского льда при макро-разрывах // ДАН. 1996. № 2. С. 253–255.
16. Richter-Merge J.A., McNutt S.L., Overland J.E., Kwok R. Relating arctic pack ice stress and deformation under winter conditions // Journ. of Geophys. Research. 2002. 107. № 10. P. SHE 15/1–SHE 15/13. Doi: 10.1029/2000JC000477.
17. Горбунов Ю.А., Карелин И.Д., Лосев С.М. Природа нарушения сплошности морского ледяного покрова в зимнее время // МГИ. 1986. Вып. 55. С. 131–134.
18. Лосев С.М., Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н., Сергеева И.А. Макродеформации ледяного покрова в Арктическом бассейне // Метеорология и гидрология. 2005. № 8. С. 38–50.
19. Лосев С.М., Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н. Разрывы в ледяном покрове Арктического бассейна по спутниковым данным // Проблемы Арктики и Антарктики. 2002. Вып. 73. С. 36–52.
20. Лосев С.М., Дымент Л.Н. Повторяемость крупномасштабных вихревых образований в полях скорости дрейфа льда Арктического бассейна как показатель его интенсивности // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 72–83.
6. Brestkin S.V., Gorbunov Ju.A., Losev S.M. Ice information as an element of provision of navigation of transport submarines in the Arctic. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Arkticheskiy most»*. Materials of Scientific-Practical Conf. «The Arctic Bridge». Arkhangelsk, 1993: 58–61. [In Russian].
7. Brestkin S.V., Gorbunov Ju.A., Losev S.M. Results of statistical analysis of satellite data on leads in ice cover in the south-western Kara Sea and their passable use for planning sea operations during the winter-spring period. POAC'95 August 15–18 1995. Murmansk. St. Petersburg. 1995, 3: 60–68.
8. Gorbunov Ju.A., Diment L.N., Losev S.M. Taking into account generalized characteristics of leads in the ice cover for selecting the routes of ship escort by icebreakers. INSROP Working paper. 1996, 68 (141): 10–20.
9. Gorbunov Ju.A., Dymant L.N., Losev S.M. *Srednie mnogoletnie kharakteristiki krupnykh narusheniy sploshnosti l'da v Karskom more i severo-vostochnoy chasti Barentseva morya. Spravochnoe posobie*. Average multiyear characteristics of large leads in the Kara Sea in the north-eastern Barents Sea. Reference guidebook. St. Petersburg: Rotaprint of the AARI, 2014: 36 p. [In Russian].
10. Frolov S.V., Klyachkin S.V. Account of the influence of orientation leads in the ice cover on the ship motion speed in ice. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 2001, 443: 103–111. [In Russian].
11. Bushuev A.V. The development and improvement of the system and methods of ice observations. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 1991, 66: 170–183. [In Russian].
12. Losev S.M., Gorbunov Ju.A., Dymant L.N. Evaluation of characteristics of leads in the ice cover of the Laptev Sea imagery airborne radar side-view, and imagery of Earth satellites «Meteor» and NOAA. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2003, 2: 59–67. [In Russian].
13. Losev S.M., Gorbunov Ju.A. Diagnostics and medium-range forecast of leads of sea ice cover. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1998, 438: 13–25. [In Russian].
14. Gorbunov Ju.A., Timokhov L.A. Variability of ice fragmentation. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1973, 316: 89–94. [In Russian].
15. Sukhorukov K.K. On the mechanism of formation of the stress state of sea ice at macro-discontinuities. *Doklady Akademii Nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 1996, 2: 253–255. [In Russian].
16. Richter-Merge J.A., McNutt S.L., Overland J.E., Kwok R. Relating arctic pack ice stress and deformation under winter conditions. Journ. of Geophys. Research. 2002, 107 (10): SHE 15/1–SHE 15/13. Doi: 10.1029/2000JC000477.
17. Gorbunov Ju.A., Karelin I.D., Losev S.M. Nature of leads of sea ice cover in the wintertime. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1986, 55: 131–134. [In Russian].
18. Losev S.M., Gorbunov Ju.A., Dymant L.N., Sergeeva I.A. Macro-deformations of the ice cover in the Arctic Basin. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2005, 8: 38–50. [In Russian].
19. Losev S.M., Gorbunov Ju.A., Dymant L.N. Leads in the ice cover of the Arctic Basin based on satellite data. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2002, 73: 36–52. [In Russian].
20. Losev S.M., Dymant L.N. Recurrence of large-scale eddy features in the ice drift velocity fields in the Arctic Basin as indicator of its intensity. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2016, 10: 72–83. [In Russian].