

С.М.ЛОСЕВ, Ю.А.ГОРБУНОВ, Л.Н.ДЫМЕНТ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРЯД ТОРОСОВ НА ДРЕЙФУЮЩИХ ПОЛЯХ ОДНОЛЕТНЕГО ЛЬДА В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ ПО ДАННЫМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

Изложена технология получения исходных данных по материалам аэрофотосъемки, выполненной на двух полигонах в мае 2001 г. Камеральные работы осуществлялись по фотосхемам, на которых с помощью дигитайзера были оцифрованы все зафиксированные гряды торосов. Приведены результаты анализа рассчитанных характеристик плотности гряд, их протяженности и ориентации. В полях плотности и длины гряд отмечено наличие мезомасштабных структурных образований. Установлено, что распределения направления гряд характеризуются четко выраженной асимметрией.

Анализируемая информация о грядах торосов получена по материалам плановой площадной аэрофотосъемки, выполненной в мае 2001 г. в северной части Баренцева моря на двух полигонах. Этот вид наблюдений уже много лет успешно используется при изучении торосов. Каждое его применение приводит к сбору большого количества надежных данных, позволяющих провести их статистическое обобщение [3, 5, 6].

Полигоны располагались в сравнительно небольшой области в двухстах километрах к юго-западу от Земли Франца-Иосифа между параллелями 78° 13' – 78° 26' с.ш. и меридианами 42° 55' – 45° 55' в.д. (табл. 1). Расстояние между центрами полигонов составляло около 60 км. Съемка осуществлялась с вертолета, который базировался на научно-экспедиционном судне «Михаил Сомов». Полигоны выбирались с таким расчетом, чтобы в зону съемки попадали достаточно крупные ледяные поля со значительной торосистостью.

В период наблюдений отмечалась малооблачная погода, что позволило вести аэрофотосъемку в масштабе 1:10 000. Поперечное перекрытие между снимками смежных маршрутов задавалось равным 25 %, продольное перекрытие по маршруту полетов составляло 60 %. В рамках первого полигона аэрофотосъемка была произведена на семи параллельных маршрутах, на втором – на шести. Их протяженность в обоих случаях составляла от 6 до 12 км.

Камеральные работы выполнялись по мозаичным фотосхемам, составленным из полученных снимков. Географическая привязка фотосхем осуществлялась

Таблица 1

Основные сведения о полигонах аэрофотосъемки в 2001 г.

№ полигона	Дата съемки	Географические координаты центра полигона		Площадь, с которой получены исходные данные, км ²
		φ	λ	
1	17.05	78° 22,1'	43° 08'	54,67
2	20.05	78° 16,4'	45° 44'	53,39

по координатам φ , λ , которые во время полетов были зафиксированы по GPSMAP на каждом маршруте в моменты экспозиции первого и последнего снимков. Данные координаты можно отнести к центрам указанных снимков и на этой основе произвести плановую привязку фотосхем.

Гряды торосов на фотосхемах измерялись с применением дигитайзера (оцифровка гряд). Для реализации на нем этой процедуры предусматривается применение прямоугольной системы координат, которая на каждой фотосхеме выбирается произвольно.

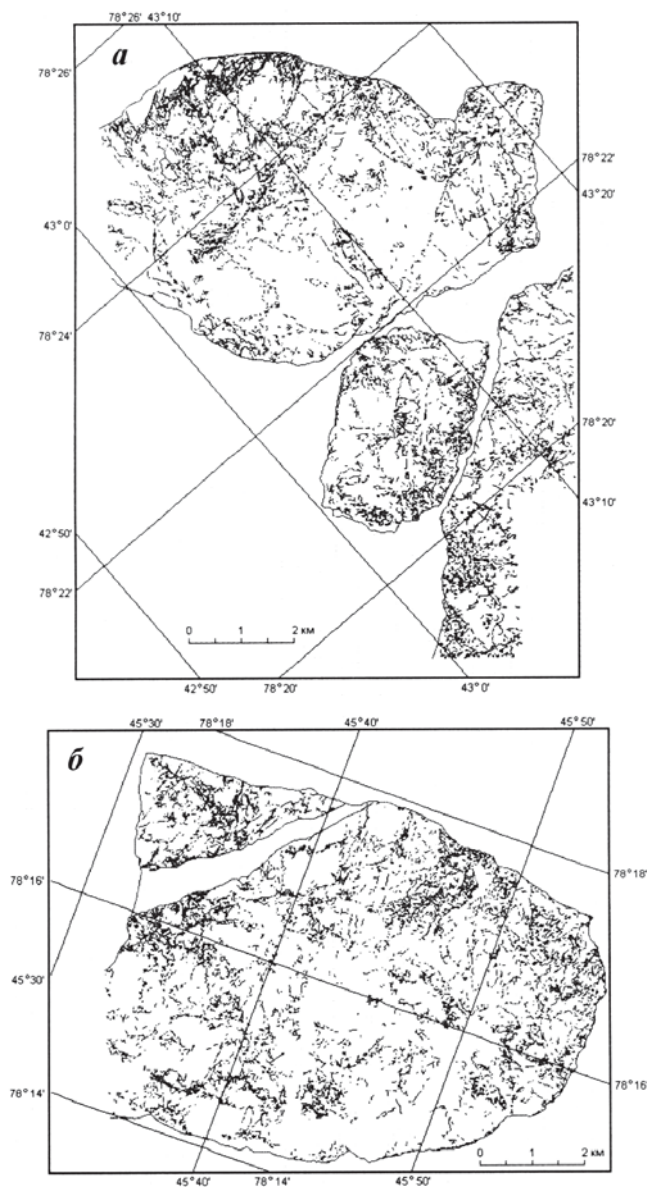


Рис. 1 Результаты оцифровки гряд торосов на фотосхемах: *a* – полигон № 1, *б* – полигон № 2

В процессе оцифровки гряд на фотосхеме, установленной на планшете дигитайзера, оператор световым пером последовательно касается точек, расположенных вдоль гребня торосистого образования. В компьютере при этом рассчитываются их прямоугольные координаты x_i, y_i . Точки выбираются таким образом, чтобы отрезки между ними можно было считать прямолинейными. Чем извилистее гряда, тем чаще берутся точки. Опыт показал, что длина элементарных отрезков между точками находится в основном в пределах 2,5–4 мм. Кроме гряд торосов могут оцифровываться контуры ледяных полей, на которых расположены дешифрируемые торосы, а также зоны ровного льда. В ходе работы оцифрованные объекты воспроизводятся на экране дисплея, что позволяет контролировать полноту и правильность выполняемой процедуры.

На фотосхеме полигона № 1 гряды торосов оцифрованы на трех ледяных полях (рис. 1 а). Размеры поля 1 по наибольшему взаимноперпендикулярным поперечникам составили 9 и 5 км. Аналогичные поперечники поля 2 были равны 4 и 2,5 км. Согласно существующей классификации обе льдины относятся к обширным ледяным полям (поперечники от 2 до 10 км). Значительная часть поля 3 находилась за рамкой полигона. Зафиксированная часть льдины имела протяженность 7,5 км. Учитывая ее очертания, можно полагать, что это поле принадлежит к разряду гигантских ледяных полей.

На второй фотосхеме оцифровка выполнена на гигантском ледяном поле, которое занимало почти всю площадь полигона. Наибольший поперечник поля превышал 10 км, а второе сечение составляло 7 км. В левой верхней части поля имеется старый замерший разрыв, покрытый серо-белым льдом, который спаял основную часть поля с ранее отколовшейся частью. Торосы на поверхности льда в разрыве отсутствуют. Длина разрыва равна 4,3 км, а ширина постепенно увеличивается от 200 до 800 м.

Все ледяные поля на обоих полигонах являлись сморозьями однолетнего тонкого льда. На их поверхности отмечалось значительное количество протяженных и довольно широких гряд, которые уверенно дешифрировались на аэрофотоснимках. На некоторых участках полей имелись пояса торосов шириной 30–50 м, состоящие из 3–5 близко расположенных друг к другу гряд. Протяженность поясов составляла от 150 до 800 м. Вмерзшие в поля льдины отчетливо выделялись благодаря валикам торосов, которые сформировались на кромках льдин до образования сморозей. Всего на обоих полигонах было опознано и оцифровано 11491 гряда.

Расчет географических координат φ, λ любой точки фотосхемы по ее прямоугольным координатам x_p, y_p , измеренным на дигитайзере, а также расчет географической сетки на область оцифрованных гряд требуют определения элементов географической привязки фотосхемы. К ним относятся:

- меридиан λ_x , параллельный оси x принятой прямоугольной системы координат;
- координаты Северного полюса x_p, y_p в этой системе;
- масштабный коэффициент фотосхемы M .

Эти параметры вычислялись по зафиксированным во время аэрофотосъемки географическим координатам φ_0, λ_0 центров аэрофотоснимков и прямоугольным координатам x_0, y_0 , установленным оцифровкой тех же центров на фотосхемах. Расчеты выполнялись по соотношениям, приведенным в работе [1].

Все вычисления, связанные с географической привязкой фотосхем, оцифровкой на них гряд торосов, получением численных значений характеристик каждой гряды и характеристик, обобщенных в рамках полигона или его отдельных частей, осуществлялись на основе специально разработанного комплекса программного обеспечения.

Приведем совокупность элементов, которые рассчитываются для каждой гряды по результатам ее оцифровки. Длина l_i элементарного отрезка гряды между точками i и $i+1$ равна

$$l_i = [(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2]^{1/2}.$$

Сумма входящих в грядку отрезков l_i представляет ее общую протяженность l

$$l = \sum_{i=1}^n l_i.$$

Расстояние по прямой между первой и последней точками гряды, координаты которых равны соответственно x_1, y_1 и x_n, y_n , является ее результирующей длиной l'

$$l' = [(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2]^{1/2}.$$

Чем больше различие между величинами l_i и l'_i , тем извилистей гряда. Отношение $k = l_i / l'_i$ принято считать коэффициентом извилистости.

Ориентация элементарных отрезков гряд рассчитывалась относительно одного общего меридиана λ , заданного для района съемки. Отсчитываемый по часовой стрелке угол α_i между северным направлением этого меридиана и оцифрованным отрезком равен

$$\alpha_i = 360 + \lambda - \lambda_x - \arctg \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}.$$

По данным фотосхем обоих полигонов ориентация отрезков вычислялась относительно меридиана $\lambda = 45^\circ$ в.д.

Пространственное обобщение первичных данных осуществлялось по квадратам сетки 1×1 км, в рамках отдельных ледяных полей и по полигонам в целом. При этом рассчитывались характеристики плотности гряд, их длины и ориентации. Последняя представлена тремя параметрами. Первым из них является результирующее направление гряд α_r

$$\alpha_r = \frac{1}{2} \arctg \frac{\sum_{i=1}^n l_i \sin \alpha_i}{\sum_{i=1}^n l_i \cos \alpha_i}.$$

Это направление примечательно тем, что сумма проекций на него всех элементарных отрезков максимальна.

Второй параметр — модальная ориентация гряд α_m , то есть то направление, которому соответствует максимальная плотность вероятности ориентации элементарных отрезков. Величина α_m рассчитывается путем суммирования длины отрезков, направление которых попадает в скользящий интервал $\alpha_k \pm \Delta\alpha$. Каждая последующая сумма подсчитывается при смещении интервала на 1° . Направление α_k последовательно проходит диапазон от 0 до 179° . То значение α_k , при котором $\sum l_i$ оказывается наибольшей, принимается за модальное направление гряд α_m в рассматриваемой зоне. Опытным путем установлено, что величину $\Delta\alpha$ в расчетах целесообразно задавать равной 10° .

Третьей величиной является обеспеченность p_m ориентации гряд в интервале $\alpha_m \pm \Delta\alpha$, то есть отношение совокупной длины отрезков, направление которых попадает в заданный интервал, к общей длине всех отрезков в зоне. Эта величина позволяет судить о степени упорядоченности ориентации гряд относительно друг друга. Если направления всех элементарных отрезков гряд на поверхности льда равновероятны, то при $\Delta\alpha = 20^\circ$ величина p составляет 22 %. Чем больше рассчитанная обес-

печенность превышает эту величину, тем большее число гряд имеет близкую ориентацию и, следовательно, тем значительнее упорядоченность их направления.

Для получения наиболее полного и всестороннего представления о плотности гряд также использована совокупность характеристик. В нее включены число гряд m на площади 1 км^2 , среднее число гряд q , пересекаемых на протяжении 1 км в выделенной зоне, удельная длина гряд l^* равная средней их протяженности на площади 1 км^2 , среднее расстояние между грядами f . Параметры q и f рассчитывались по створам, проходящим с шагом 10 м по нормали к результирующему направлению гряд α , в зоне.

Рассмотренная технология первоначально была применена авторами для оцифровки разрывов в ледяном покрове, которые фиксируются на снимках, принимаемых с искусственных спутников Земли [2, 4], а затем и для оцифровки гряд торосов на аэрофотоснимках, смонтированных в фотосхемы. При этом она подверглась некоторой доработке и уточнению с учетом специфики как самих фотосхем, так и отображенных на них объектов.

Рассмотрим кратко основные результаты расчета обобщенных характеристик гряд.

Плотность гряд. Данные, полученные по сетке квадратов $1 \times 1 \text{ км}$, позволили установить, что в пределах каждого полигона все осредненные характеристики плотности гряд имеют весьма значительную пространственную изменчивость. Обратимся к диапазонам изменения рассчитанных характеристик

Полигон	m	q	l^* , м/км ²	f , м
№ 1	33–371	1,2–17,2	1570–24190	58–813
№ 2	29–315	1,1–14,4	1660–19720	70–819

Как видим, наибольшие и наименьшие значения характеристик различаются в 11–15 раз. При этом границы самих диапазонов на полигонах довольно близки между собой, что свидетельствует о статистической близости анализируемых данных.

Естественно, чем меньше плотность гряд, тем дальше они расположены друг от друга. Средние значения расстояний между грядами на обоих полигонах не превышали 820 м .

На поверхности ледяных полей значения удельной длины распределены не бессистемно. В поле l^* отчетливо проявляется наличие мезомасштабных зон с повышенной и пониженной плотностью гряд (рис. 2).

Зоны в основном имеют форму неправильного вытянутого овала. Размеры пространственных структурных образований оценивались по протяженности двух сечений, заданных от центра зоны повышенной удельной длины до линии, которая проходит вокруг зоны по точкам с наименьшими значениями l^* . Одно из сечений выбиралось вдоль зоны, а второе – поперек ее. Соответственно, их длина относится к продольной и поперечной осям структурного образования. По данным девяти измерений малых (поперечных) полуосей их длина находилась в пределах от $1,3 \text{ км}$ до $3,7 \text{ км}$, а средняя величина составила $2,2 \text{ км}$. Протяженность больших полуосей варьировала от $2,2 \text{ км}$ до $5,5 \text{ км}$. Средняя их длина равна $3,9 \text{ км}$. Расстояние между точками с максимальной удельной длиной на обоих полигонах изменялось в диапазоне $4,3–8,1 \text{ км}$ и в среднем равно $5,8 \text{ км}$.

Большие пространственные различия плотности гряд обусловлены в основном тем, что при образовании сморозей на некоторых льдинах плотность гряд была довольно значительной, тогда как на других гряды имелись только на их краях. Остальная часть поверхности таких льдин представляла собой зоны ровного или шероховатого льда, в которых гряды практически отсутствовали.

Характеристики плотности гряд, обобщенные по площади ледяных полей полигона № 1, существенно ближе друг к другу, чем при расчете по квадратам

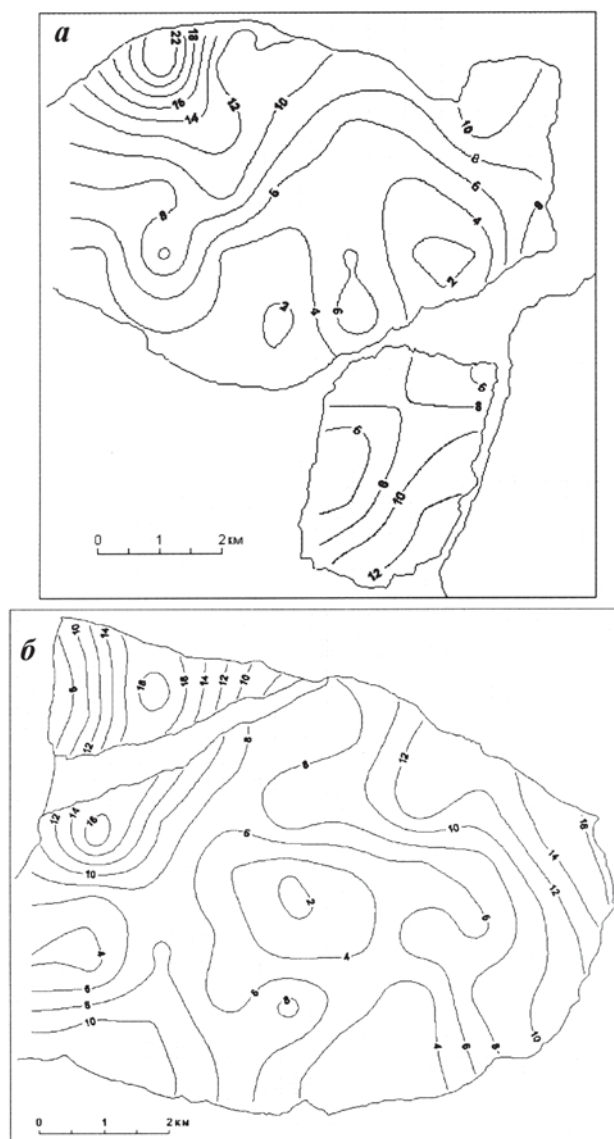


Рис. 2. Удельная длина гряд торосов, тыс. м/км²: *a* – полигон № 1, *б* – полигон № 2

1×1 км (табл. 2). Наименьшая плотность гряд отмечалась на ледяном поле 1, а наибольшая – на поле 3. Однако все рассматриваемые характеристики различаются не более чем в 1,7 раза.

При обобщении данных в целом по полигону № 1, то есть с увеличением объема выборки, рассчитанные для него характеристики становятся близкими к аналогичным характеристикам, полученным по выборке полигона № 2. Разность значений параметров q и l составляет меньше 2 % от их величины, а значений параметра f не превышает 2,3 % от среднего расстояния между грядами. Такое

Таблица 2

Характеристики плотности гряд на ледяных полях

Характеристика	Полигон № 1				Полигон № 2	Оба полигона
	ледяное поле 1	ледяное поле 2	ледяное поле 3	полигон в целом		
Число измеренных гряд	3620	694	1143	5457	6034	11491
Среднее число гряд q на протяжении 1 км	4,9	5,8	8,2	5,5	5,6	5,6
Среднее число гряд m на площади 1 км ²	129	139	191	140	147	144
Удельная длина l^* , м/км ² ·10 ³	7,40	7,83	10,69	7,96	7,82	7,89
Число измеренных расстояний между грядами	13767	2890	4894	21551	22612	44163
Среднее расстояние f , м	203	173	123	181	177	179
Среднее квадратическое отклонение σ_f , м	453	245	157	382	463	425

различие средних с учетом дисперсии расстояний σ_f и числа выполненных измерений согласно произведенной оценке с достаточно большой вероятностью может рассматриваться как случайное. Отсюда следует, что совокупности данных, полученные на обоих полигонах, можно отнести к одной общей совокупности и объединить их, используя общие статистики параметров и общее распределение расстояния между грядами. По объединенным данным удельная длина гряд торосов в районе исследований составляла 7890 м/км². При этом на протяжении 1 км в среднем пересекается 5–6 гряд по нормали к их результирующему направлению.

Повторяемость расстояний между грядами торосов постепенно уменьшается с увеличением самих расстояний (рис. 3). По данным объединенной выборки расстояния до 200 м составляют 75 % от ее объема, а расстояния от 1,1 км и больше не превышают 0,85 %. Для аппроксимации распределения расстояний использовано уравнение логарифмически нормальной кривой

$$p_i = \frac{k \cdot \Delta f}{\sigma_z \tilde{f}_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u_i^2}{2}},$$

где p_i – повторяемость i -го интервала (%), \tilde{f} и Δf – его середина и величина (м) соответственно, k – эмпирический коэффициент, $u = (\tilde{z}_i - z_0)/\sigma_z$, причем $\tilde{z}_i = \ln \tilde{f}$.

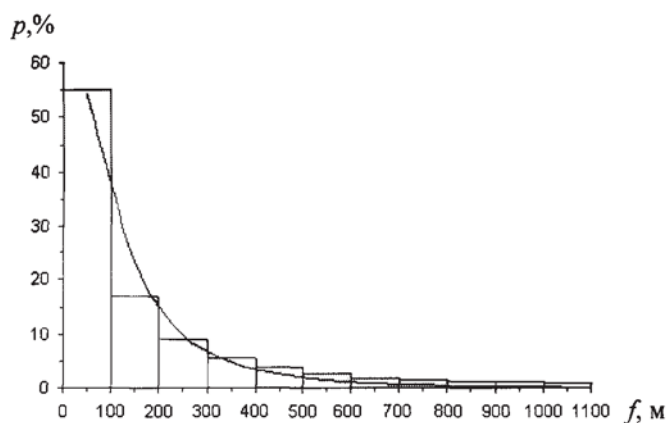


Рис. 3. Распределение расстояния между грядами торосов

Здесь z_0 и σ_z – соответственно среднее значение и среднее квадратическое отклонение величины $z_i = \ln f_i$, рассчитанные по данным всей выборки.

Подстановка в формулу численных значений входящих в нее параметров приводит это выражение к более простому виду

$$p_i = \frac{ae^{-\frac{u^2}{2}}}{\bar{f}_i} \Delta f.$$

Установленные по фактическим данным параметры равны $a = 3754,286$, $z_0 = 4,678926$, $\sigma_z = 0,947257$.

Характеристики плотности гряд статистически взаимосвязаны между собой. Наиболее тесная связь, близкая к функциональной, отмечается между удельной длиной l^* и средним числом гряд, пересекаемых на протяжении 1 км. Она может быть представлена линейным уравнением

$$l^* = 1356 \cdot q.$$

Коэффициент детерминации связи равен 0,99. Обеспеченность уравнения при допуске $0,674\sigma_{l^*}$ составляет 100 %.

Связи между l^* и m , между m и q также хорошо аппроксимируются линейными уравнениями

$$l^* = 55 \cdot m,$$

$$m = 24,2 \cdot q.$$

Для обоих уравнений коэффициент детерминации и обеспеченность совпадают и равны соответственно 0,98 и 99 %.

Исходя из того, что величины q и f являются обратными, можно записать еще два соотношения

$$l^* = \frac{1356 \cdot 10^3}{f} \quad \text{и} \quad m = \frac{24163}{f}.$$

Установленные уравнения полезны в том отношении, что по маршруту полета вертолета величина q может быть оценена на основе визуального подсчета числа пересекаемых гряд. Далее по данным таких наблюдений формулы позволяют найти оценки других характеристик плотности в случае, если по каким-либо причинам выполнить аэрофотосъемку нет возможности.

Протяженность гряд. Средняя длина гряд l , рассчитанная по квадратам 1×1 км, более устойчива в пространстве по сравнению с обобщенными характеристиками их плотности. Диапазоны изменения l и σ_l на полигонах составляли

	Поле 1	Поле 2	Поле 3	Весь полигон № 1	Полигон № 2
Число квадратов	28	5	6	39	41
l , м	44,1–89,4	51,9–63,3	50,6–61,0	44,1–63,3	43,2–67,2
σ_l , м	14,2–80,2	29,3–35,7	30,1–48,8	14,2–80,2	19,7–49,8

Из приведенных данных следует, что в общей их совокупности наибольшее среднее значение l в квадрате превышает ее наименьшую величину только в два раза. Границы диапазонов на обоих полигонах в целом сравнительно близки между собой. Дисперсия длины гряд, рассчитанная по тем же квадратам, возрастает с увеличением их средней протяженности. Линейная связь между σ_l и l в пределах ледяных полей характеризуется коэффициентом корреляции 0,75–0,9.

В поле средней протяженности гряд, как и в поле удельной длины, отмечается наличие мезомасштабных структурных образований (рис. 4).

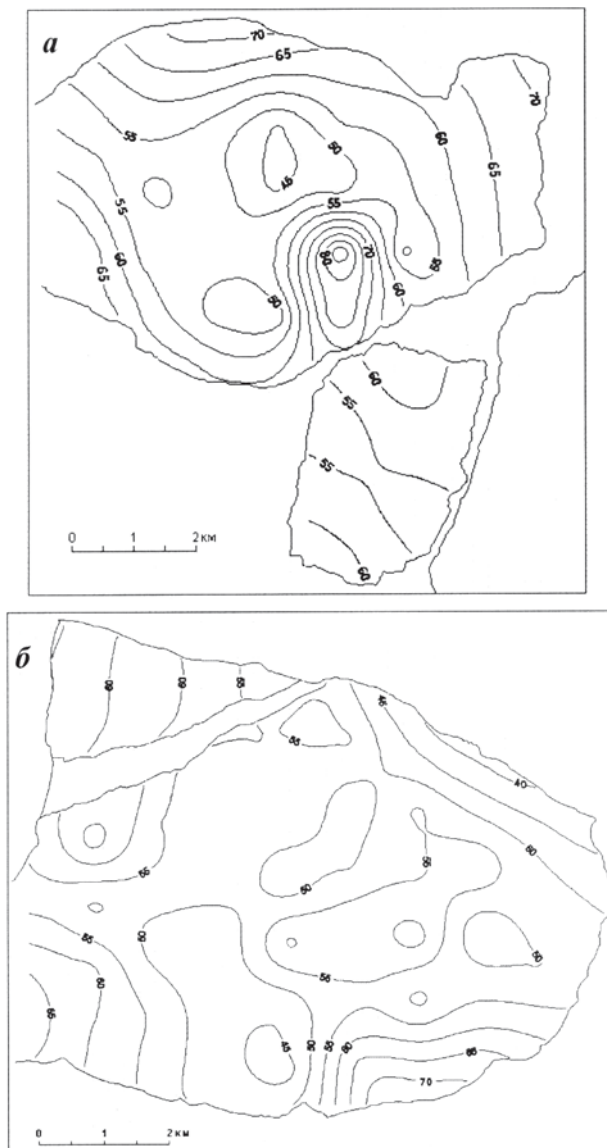


Рис. 4. Средняя протяженность гряд торосов, м: *a* – полигон № 1, *б* – полигон № 2

На ледяном поле полигона № 1 отчетливо выделяется зона с повышенной длиной гряд, в центральной части которой имеются замкнутые изолинии со значениями l от 70 м до 85 м. Аналогичная зона с замкнутыми изолиниями 55 м и 60 м зафиксирована и на ледяном поле второго полигона.

Размеры зон здесь также оценивались по двум полуосям. По объединенным данным обоих полигонов длина большой полуоси находилась в диапазоне 2,5–4,1 км, а ее среднее значение составило 3,1 км. Протяженность малой полуоси изменялась от 1,1 км до 2,5 км при средней величине 1,8 км. Расстояния между максимумами длины гряд в зонах находились в пределах от 4,3 км до 8,1 км.

Таблица 3

Обобщенные характеристики длины гряд торосов

Характеристика	Полигон № 1				Полигон № 2	Оба полигона
	ледяное поле 1	ледяное поле 2	ледяное поле 3	полигон в целом		
Число измеренных гряд	3620	694	1143	5457	6034	11491
Наибольшая длина, м	385	283	648	648	627	648
Средняя длина, м	57,2	56,4	56,1	56,9	53,1	54,9
Среднее квадратическое откл., м	38,4	32,0	35,9	37,5	35,4	36,5
Коэффициент извилистости	1,10	1,08	1,10	1,10	1,10	1,10

Среднее расстояние равно 5,8 км. Из сравнения размеров структурных образований в поле протяженности гряд с аналогичными показателями поля удельной длины следует, что, хотя масштабы образований этих полей и близки друг к другу, в целом для удельной длины они примерно в 1,1 раза больше, чем для протяженности гряд. Примечательно, что отношение средней длины большой полуоси зон к средней длине их малой полуоси, рассчитанное по данным структурных образований поля удельной длины, равно 1,77, а то же отношение, рассчитанное применительно к протяженности гряд, составило 1,72. Такая близость значений этого параметра свидетельствует о наличии некоторого подобия в форме структурных образований, проявляющихся в полях рассматриваемых характеристик. Вместе с тем статистическая взаимосвязь между l и l' практически отсутствует. Коэффициенты их корреляции на полигонах № 1 и № 2 очень незначительны и соответственно равны 0,11 и 0,12. Отсюда понятно, что какого-либо соответствия в пространственном положении структурных зон в полях длины гряд и их плотности быть не может. Действительно, зоны с повышенными значениями l занимают различное положение по отношению к зонам удельной длины.

Средние значения длины гряд, обобщенные на полигоне № 1 по каждому ледяному полю (табл. 3), очень близки между собой. Незначительно различаются

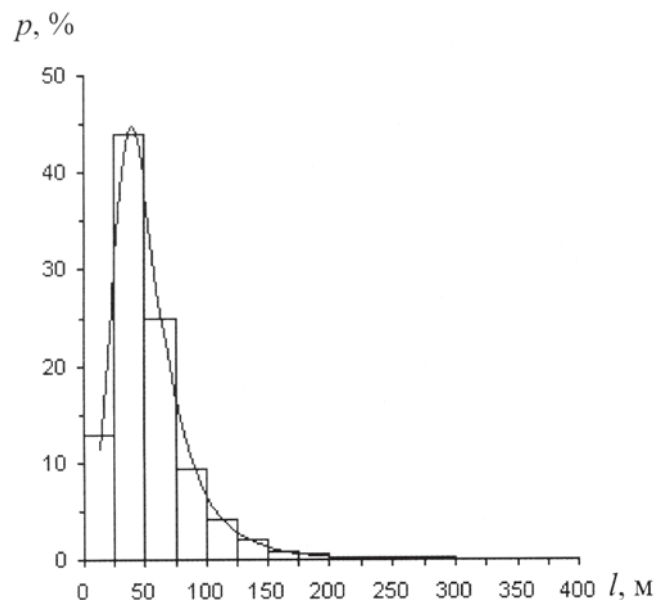


Рис. 5. Распределение длины гряд торосов

и средние квадратические отклонения σ_l . Средняя длина гряд, рассчитанная по совокупности данных всего полигона, только на 3,8 м больше средней на полигоне № 2. Аналогичное различие для σ_l еще меньше и составляет 2,1 м. Близки между собой и значения максимальной протяженности гряд на полигонах, равные 648 м и 627 м. В общей совокупности данных, объединенных по двум полигонам, средняя длина гряд равна 54,9 м при $\sigma_l = 36,5$ м. Из величины коэффициента извилистости следует, что фактическая протяженность гряд только на 10 % больше их результирующей длины.

Распределение длины гряд торосов имеет значительную асимметрию и большой эксцесс (рис. 5). Сравнительно короткие гряды с $l < 75$ м составляют 81,9 %, причем наибольшая повторяемость, близкая к 45 %, приходится на интервал 25–50 м. Гряды повышенной протяженности с $l > 200$ м составляют всего 0,9 %.

Эмпирическое распределение длины гряд торосов, как и распределение расстояний между ними, хорошо выравняется кривой логарифмически нормального распределения. По фактическим данным установлены следующие значения параметров ее уравнения: $\alpha = 73,10099$, $z_0 = 3,84919$, $\Delta z = 0,54071$.

При расчете теоретической повторяемости первого интервала значения его середины \tilde{l}_1 и его величины Δl принимаются с учетом минимальной протяженности оцифрованных гряд. В нашем случае последняя составляла 10 м. Отсюда, при правой границе этого интервала 25 м, имеем $\tilde{l}_1 = 17,5$ м, $\Delta l = 15$ м.

Ориентация гряд. Ледяные поля, дрейфующие в открытом море, в течение зимы неоднократно подвергаются сжатиям. Наиболее значительные из них сопровождаются торошением льда. Каждое сжатие может иметь свое направление. Соответственно, ориентация образующихся при этом гряд также будет различна. Кроме того, ледяные поля в ходе поступательного перемещения обычно вращаются. По этой причине, даже в случае, если направление повторных сжатий изменяется незначительно, ориентация вновь образовавшихся гряд каждый раз будет иной. В результате повторения сжатий распределение направления гряд к концу периода развития полей должно стать близким к равномерному, при котором все направления равновероятны.

Такая гипотеза формирования на дрейфующем льду к концу зимы хаотического распределения направления гряд торосов [7] кажется достаточно правдоподобной. Возможно, в некоторых районах она действительно реализуется. Однако в нашем случае данные, полученные на полигонах, этой гипотезе не соответствуют. В мае, когда сформировавшиеся зимой сморози однолетнего льда начали распадаться, распределения ориентации гряд торосов оказались весьма анизотропными (рис. 6). Даже на ледяном поле 1 первого полигона, где анизотропия выражена в меньшей степени, чем на полях 2 и 3, относительное количество гряд в шестидесятиградусном секторе 80–140° достигает 39 %, тогда как в таком же секторе 0–60° – только 26 %, то есть в 1,5 раза меньше. На ледяных полях 2 и 3 повторяемости в указанных секторах различаются соответственно в 2,5 и 3 раза.

Гистограммы распределения ориентации гряд на рис. 6 представлены в круговом виде, поскольку два направления гряды, различающиеся на 180°, равнозначны.

Наличие на поверхности ледяных полей не хаотически ориентированных гряд торосов, а их системы с преобладающим направлением позволяет предположить, что эта система могла образоваться при реализации не менее двух условий, которые противоположны исходным посылкам приведенной выше гипотезы. Во-первых, направления сжатий на льду, вызывающих грядообразование, в основном должны были быть близкими. Очевидно, что в открытом море число таких сжатий не могло быть значительным. Во-вторых, в довольно небольшой зоне первого

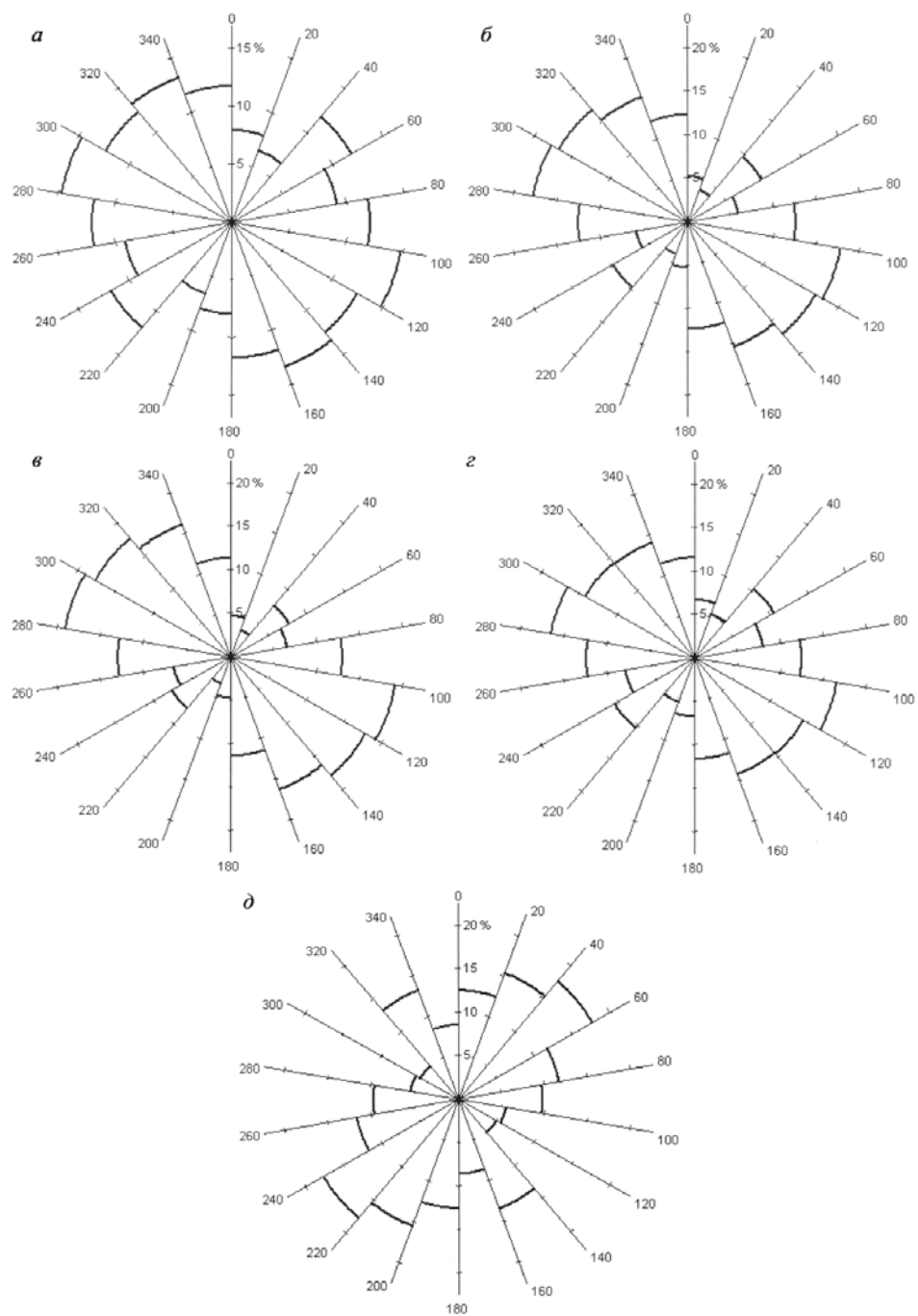


Рис. 6. Распределение ориентации гряд торосов на полигонах аэрофотосъемки: *а, б, в* – соответственно ледяные поля 1, 2, 3 на полигоне № 1, *г* – весь полигон № 1, *д* – ледяное поле на полигоне № 2

Таблица 4

Характеристики ориентации гряд торосов на ледяных полях

Характеристика	Полигон № 1				Полигон № 2
	ледяное поле 1	ледяное поле 2	ледяное поле 3	полигон в целом	
Число ориентированных отрезков	11074	2689	4851	18614	15601
α_r , градусы	124	127	125	125	29
α_{m_1} , градусы	110	110	110	110	48
p_{m_1} , %	32	41	42	36	36
α_{m_2} , градусы	56	53	58	56	155
p_{m_2} , %	21	16	14	18	21
$\alpha_{m_1} - \alpha_{m_2}$, градусы	54	56	53	54	73

полигона дрейфующие льдины вследствие их «плотной упаковки» не должны были иметь вращательного движения относительно друг друга. Реальность выполнения этого условия полностью подтверждается абсолютным совпадением значений первой моды на всех полях полигона (табл. 4). Кроме того, наименьшие повторяемости в каждом из трех распределений отмечаются в одном и том же интервале 20–40°. Если бы поля имели хоть малейшие взаимные повороты, такого совпадения указанных характеристик не случилось.

Анизотропия в распределениях ориентации гряд торосов на дрейфующем льду выявлена и в других регионах. Так, в море Бофорта преобладающее направление гряд совпадало с генеральным направлением береговой черты [8].

На всех полях первого полигона повторяемость ориентации гряд p_{m_1} вблизи первой моды в секторе $\alpha_{m_1} \pm 20^\circ$ довольно высокая и составляет 32–42%. Это на 10–20% больше той повторяемости, которая при равномерном распределении направлений в интервале шириной 40° равна 22%.

В распределениях ориентации, которые относятся к полям 1 и 2, наряду с первой модой α_{m_1} имеется второе модальное направление α_{m_2} . Оно проявляется и в распределении направления гряд на поле 3, но выражено не столь четко, как на первых двух полях. Средняя повторяемость ориентации гряд p_{m_2} в секторе $\alpha_{m_2} \pm 20^\circ$ на полигоне № 1 составляет 18%. Случаи двумодального распределения ориентации гряд отмечены и в работе [5].

Во всех распределениях первого полигона вторая мода приходится на интервал 40–60°, а ее численные значения различаются не более чем на 5°. Угол между направлениями первой и второй моды также довольно стабилен. Его средняя величина равна 54°. Незначительно различалось и результирующее направление гряд α_r . Близость характеристик распределения, полученных по данным отдельных полей, явилось основанием для расчета общего распределения направления гряд на первом полигоне.

На ледяном поле второго полигона распределение ориентации гряд торосов во многом аналогично ее распределению на полигоне № 1. Здесь достаточно четко выражены и анизотропия распределения, и наличие второй моды. Однако все распределение в целом развернуто относительно распределения первого полигона против часовой стрелки примерно на 90°. Последнее не означает, что формирование

гряд на полигонах происходило при различных грядообразующих процессах. Весьма незначительная разница характеристик плотности гряд, а также их длины говорит об обратном. В распределениях ориентации гряд тоже имеется ряд совпадений. Так, повторяемость гряд p_{m_1} вблизи первой моды в секторе $\alpha_{m_1} \pm 20^\circ$ на обоих полигонах одинакова и равна 36 %, а значение повторяемости p_{m_2} вблизи второй моды в секторе $\alpha_{m_2} \pm 20^\circ$ различается всего лишь на 3 %. Второй модальный интервал в распределениях ориентации как на первом, так и на втором полигонах расположен сразу за интервалом с минимальной повторяемостью направлений. При этом сами значения минимальной повторяемости одинаковы и равны 5 %. Угол между интервалами с наименьшей и наибольшей повторяемостями в распределениях обоих полигонов совпадает и равен 80 %. Сходство приведенных характеристик, безусловно, не случайно и позволяет считать, что основная часть гряд на полигонах формировалась либо при одних и тех же, либо при очень близких грядообразующих процессах, а позднее ареалы льда в зонах полигонов несколько развернулись относительно друг друга. Это и привело к кажущемуся отличию распределения ориентации на полигоне № 2 от распределения на полигоне № 1. Причиной вращения полей и ареалов льда в море является обычно пространственная неравномерность полей дрейфа.

В заключение приведем краткую сводку численных значений всех рассмотренных характеристик с тем, чтобы получить общее представление о грядах торосов, зафиксированных в изучаемом районе на дрейфующих полях сморозей однолетнего льда в период, когда начался процесс их распада. Гряды торосов в основном находились на удалении 60–820 м друг от друга по нормали к результирующему направлению. Среднее расстояние между ними составляло 180 м. При этом на площади 1 км² отмечалось от 30 до 370 гряд. Их удельная длина варьировала в диапазоне 1570–19720 м/км² при среднем значении 7890 м/км².

Наибольшая протяженность гряд достигала 648 м, тогда как средняя их длина – только 55 м. На всех ледяных полях значения средней длины различались не более чем на 4 м. Средняя величина коэффициента извилистости гряд на обоих полигонах одинакова и составляет 1,1.

В поле удельной длины гряд, обобщенной по квадратам 1×1 км, и в поле их средней протяженности имеются мезомасштабные структурные образования, поперечники которых в основном составляют 2,4 км.

Распределение направления гряд характеризуется четко выраженной анизотропией. Относительное количество гряд, направление которых попадает в интервал $\alpha_m \pm 20^\circ$, равно 36 %, что в 1,6 раза больше, чем при равномерном распределении. Угол между интервалами распределения с наибольшими и наименьшими повторяемостями ориентации гряд близок к прямому.

Сходство всех характеристик плотности, длины и направления гряд на полигонах № 1 и № 2 с учетом сравнительно небольшого расстояния между ними позволяет считать, что грядообразование в обеих зонах происходило в основном в одни и те же периоды при совпадающих или очень близких гидрометеорологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев А.В., Быченко Ю.Д. Исследование распределения и динамики морских льдов по телевизионным снимкам ИСЗ «Метеор»: Временная инструкция. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 132 с.
2. Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н., Лосев С.М. Основные результаты исследования разрывов в морском ледяном покрове // Научная конференция по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды в государствах-участни-

ках СНГ, посвященная 10-летию образования Межгосударственного совета по гидрометеорологии. Санкт-Петербург, 23–26 апреля 2002 г. Секция 2. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. С. 213–215.

3. Горбунов Ю.А., Гудошников Ю.П., Зубакин Г.К., Лосев С.М., Наумов А.К. Вероятностные оценки распределения гряд торосов в Печорском море, необходимые для планирования транспортных операций // Труды 5-й научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии (НО-2004)». Санкт-Петербург, 10–20 марта 2004 г. Т. 2. СПб.: ГНИНГИ, 2004. С. 141–146.

4. 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. 36–51.

5. Dawis N.R., Wadhams P. A statistical analysis of Arctic pressure ridge morphology // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. P. 10915–10925.

6. Hibler W.D., Ackley S.F. A sea ice terrain model and its application to surface vehicle trafficability. Washington: AIDJEX Bulletin. 1974. № 25. P. 107–124.

7. Lewis J.E., Leppaeranta M., Granberg H.B. Statistical properties of sea ice topography in the Baltic Sea // Tellus. 1993. Vol. 45A. P. 127–142.

8. Lewis J.E., Budkewitsch P., Newton G., Saged M., Frederking R. Two dimensional analysis of ice ridging in the Beaufort Sea using aerial photography // Proc. Symp. Appl. Ice and Snow Res. Rovaniemi, 18–23 April 1994. Cambridge. Ann. Glaciol. 1994. Vol. 19. P. 25–32.

S.M.LOSEV, YU.A.GORBUNOV, L.N.DYMENT

CHARACTERISTICS OF ICE RIDGES ON DRIFTING FIRST-YEAR ICE FLOES IN THE NORTHERN AREA OF THE BARENTS SEA FROM AERIAL PHOTOGRAPHY DATA

The technology of obtaining the initial data from materials of aerial photography made at two polygons in May 2001 is described. The laboratory work was performed by means of the photo-schemes, on which all ice pressure ridges were digitized using a digitizer. The results of the analysis of the calculated characteristics of the density of ice ridges, their length and orientation are presented. Presence of mesoscale structural features is noted in the fields of density and length of ice ridges is noted. It is determined that the distributions of orientation of ice ridges are characterized by pronounced asymmetry.