

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ СНИМКОВ ИСЗ НА ПОЛУЧАЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЫВОВ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

© 2021 г. Л. Н. Дымент^{а, *}, П. В. Аксенов^а, С. М. Лосев^а, В. С. Порубаев^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: ldyment@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.11.2020 г.

Проведено сравнение значений характеристик разрывов в ледяном покрове морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, рассчитанных по данным снимков с искусственных спутников Земли пространственного разрешения 250, 375 и 500 м. Показано, что модальная ориентация разрывов практически не зависит от пространственного разрешения снимков. Установлено, что между значениями пространственной плотности разрывов, рассчитанными по данным снимков различного разрешения, существует хорошая связь. Получены уравнения регрессии, позволяющие оценить значения удельной длины разрывов с шириной от 250 м по снимкам с более низким пространственным разрешением.

Ключевые слова: спутниковые снимки, пространственное разрешение, разрывы в ледяном покрове

DOI: 10.31857/S0205961421030039

ВВЕДЕНИЕ

Разрывы в дрейфующем ледяном покрове Арктического бассейна и арктических морей в зимний период образуются под влиянием неравномерности дрейфа льда. Протяженность разрывов в ледяном покрове может достигать нескольких сотен километров, иногда она сопоставима с размерами арктического моря. Ширина разрывов изменяется от нескольких метров до нескольких километров. Интерес к изучению разрывов обусловлен, прежде всего, их практической значимостью, т.к. они являются потенциальными маршрутами более легкого плавания судов при сложных ледовых условиях. Наличие систем разрывов, однонаправленных с генеральным курсом судна, существенно повышает скорость его движения (Фролов, 2001). Данные о климатических характеристиках разрывов используются при планировании морских транспортных операций (Gorbunov, 1996). На основе информации о разрывах разрабатывались методы составления прогнозов их преобладающей ориентации и зон образования (Горбунов, 2001).

В настоящее время исходными данными о разрывах в ледяном покрове являются снимки искусственных спутников Земли (ИСЗ) (Асму, 2010; Горбунов, 2001). Основным преимуществом космической съемки является высокая степень обзорности, т.е. охват одним снимком поверхности большой площади.

Основным параметром спутникового снимка является его пространственное разрешение (ПР), определяющее площадь поверхности, отображаемую на снимке одним пикселем. Снимки, поступающие с ИСЗ, подразделяются на снимки с высоким, средним и низким ПР. Численные значения границ каждой группы несколько условны и существенно зависят от области применения спутниковой информации. Так, при идентификации объектов городской структуры снимки с ПР > 50 м считаются снимками с низким ПР, тогда как при глобальной съемке океана и суши соответствующим критерием служит ПР > 250 м (Бушуев, 2011). При низком ПР предоставляется возможность охватить на одном снимке наиболее обширную территорию, но при этом различить только объекты больших размеров.

С практической точки зрения снимки с высоким и средним ПР имеют значение для ограниченного по площади района плавания. При использовании снимков с ПР 100 м и менее охваченная акватория составляет не более 300–400 км². При этом наиболее длинные разрывы оказываются не полностью вошедшими в область снимка. Составление “мозаичного” изображения из нескольких снимков значительно затрудняет весь процесс сбора исходной информации о разрывах и неизбежно вносит погрешность в получаемый результат. В связи с этим получение исходных данных о разрывах в пределах всего моря производится по

снимкам с низким ПР. На таких снимках разрывы в ледяном покрове представляются в виде узких контрастных линий на фоне сплошного ледяного покрова. При этом учитываются разрывы с открытой водой и с образовавшимся в них льдом не старше серо-белого.

При необходимости обобщить результаты обработки снимков, полученных с разных ИСЗ и имеющих различное ПР, остро встает вопрос о его влиянии на получаемые значения характеристик разрывов. В работе (Лосев, 2003) была рассмотрена зависимость плотности разрывов от ПР снимков, полученных в ноябре 1979 г. при съемке дрейфующего льда с самолета радаром бокового обзора в море Лаптевых на полигоне со сторонами 180×240 км. Однако в настоящее время для получения данных о разрывах в ледяном покрове морей обычно используются снимки ИСЗ, принимаемые в видимом и инфракрасном диапазонах.

В данной работе представлены результаты исследования влияния ПР современных спутниковых снимков на получаемые значения характеристик ориентации и плотности разрывов в ледяном покрове на всей акватории морей Лаптевых и Восточно-Сибирского.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для получения исходных данных использовались снимки ИСЗ TERRA/EOS-AM1, передаваемые спектрорадиометром MODIS в видимом и ИК-диапазонах, и снимки ИСЗ SuomiNPP с аппаратурой VIIRS, работающей в ИК-диапазоне. Снимки, передаваемые MODIS по первому и второму каналам на волнах, длина которых составляет 620–670 и 841–876 нм соответственно, имеют ПР 250 м, т.е. на них зафиксированы разрывы, ширина которых $d \geq 250$ м, а разрывы с $d < 250$ м не отображаются.

ПР снимков, передаваемых по третьему и четвертому каналам на волнах длиной 459–479 и 545–565 нм соответственно, в 2 раза ниже. Разрывы, ширина которых $d < 500$ м, на этих снимках почти не фиксируются.

Снимки, полученные с ИСЗ SuomiNPP по третьему и четвертому каналам на волнах, длина которых равна соответственно 478–488 и 545–565 нм, характеризуются ПР равным 375 м.

Для последующего анализа было отобрано по 10 спутниковых снимков с ПР 250, 375 и 500 м, половина из которых охватывала акваторию моря Лаптевых, а остальные — акваторию Восточно-Сибирского моря. Все снимки были получены за период март–апрель 2018 г. Интервал между датами приема снимков составлял 5–10 сут. В выбранные для исследования даты акватория морей была менее, чем в остальные дни рассматриваемого периода, закрыта облаками. В процессе дешифрирования и обработки снимка средствами ArcMap определялись географические координаты

каждого относительно прямолинейного участка разрыва, т.е. участка, в пределах которого изменение ориентации разрыва не превосходит 10° . По координатам концов для каждого отрезка разрыва рассчитывались его протяженность и ориентация относительно оси X , за которую было выбрано южное направление меридиана 140° з.д. В качестве примера на рис. 1 представлены результаты дешифрирования разрывов в море Лаптевых на снимках ИСЗ, имеющих различное ПР, за 6 апреля 2018 г.

Расчет характеристик разрывов проводился по квадратам регулярной сетки 100×100 км. Из-за некоторого присутствия облачности не все они были обеспечены достаточным количеством данных о разрывах. При анализе использовались только квадраты, полностью свободные от облачности на всех трех снимках за выбранную дату: с ПР 250, 375 и 500 м. В общей сложности было отобрано 77 квадратов на акватории моря Лаптевых и 144 квадрата на акватории Восточно-Сибирского моря.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве характеристики преобладающего направления разрывов в квадрате была принята их модальная ориентация α_m — направление, в диапазоне $\pm \Delta\alpha$ от которого суммарная протяженность разрывов является наибольшей.

Модальная ориентация разрывов α_m определялась по квадратам на акватории морей Лаптевых и Восточно-Сибирского при величине модального интервала равной 40° , т.е. при $\Delta\alpha = 20^\circ$. При этом, начиная с диапазона 0° – 40° , рассчитывалась суммарная протяженность прямолинейных отрезков разрывов, ориентация которых соответствовала данному интервалу. Затем последовательно границы расчетного диапазона смещались на 1° , и расчет повторялся. Таким образом, были получены значения для 180 диапазонов. За величину модальной ориентации α_{m1} разрывов в квадрате принималась середина интервала, в котором рассчитанная суммарная протяженность разрывов оказывалась максимальной. Сам интервал при этом назывался модальным. Отношение протяженности разрывов в модальном интервале к суммарной протяженности всех разрывов в квадрате отражает обеспеченность модального интервала и выражается в процентах. Иногда в квадрате присутствовало двумодальное распределение ориентации разрывов. В качестве критерия для выделения второго по значимости модального направления α_{m2} было принято выполнение следующего условия: в квадрате должен существовать диапазон ориентации разрывов с обеспеченностью не менее 25%, направление середины которого отличалось бы от ориентации первой моды не менее чем на 30° , а отношение суммарной протяженности разрывов в нем к ми-

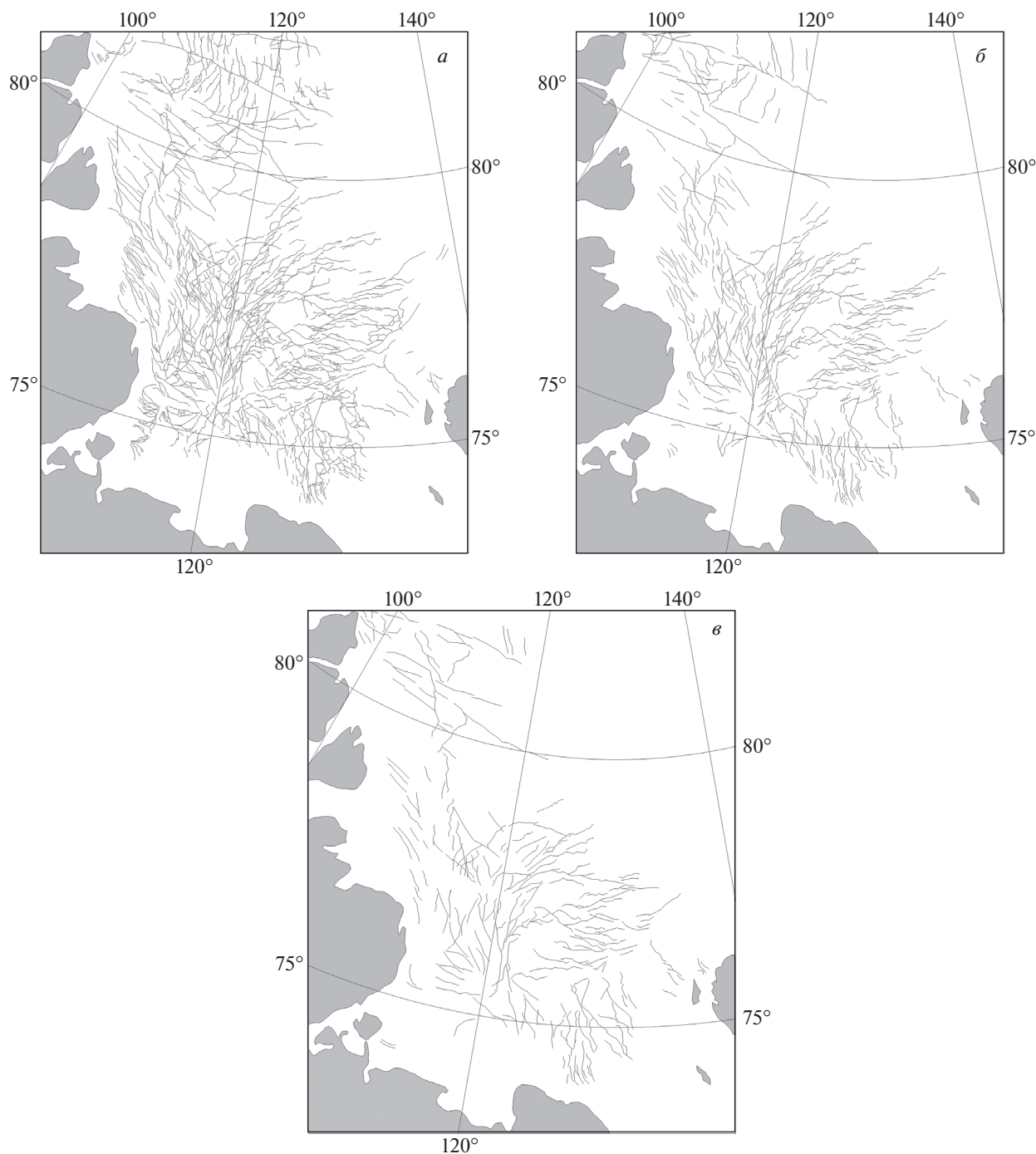


Рис. 1. Разрывы в ледяном покрове моря Лаптевых 6 апреля 2018 г., полученные по снимкам ИСЗ TERRA/EOS-AM1 (а, в) и SuomiNPP (б). а – ПР 250 м; б – ПР 375 м; в – ПР 500 м.

нимальному значению суммарной протяженности разрывов на интервалах $[\alpha_{m1}; \alpha_{m2}]$ и $[\alpha_{m2}; \alpha_{m1}]$ при этом превышало 1.4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из данных, представленных в табл. 1, следует, что средняя величина различий в значениях модальной ориентации разрывов, полученных по

спутниковым снимкам с разным ПР, не превышает 10° в море Лаптевых и 9° в Восточно-Сибирском море. Среднее квадратическое отклонение (СКО) этой величины также не велико и составляет 8° – 10° и 8° – 9° в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском соответственно.

В обоих морях встречались квадраты, в которых при уменьшении ПР снимка с 250 до 500 м

Таблица 1. Сравнение значений модальной ориентации разрывов, полученных по данным снимков ИСЗ с разным ПР

Характеристики	Море Лаптевых			Восточно-Сибирское море		
	ПР сравниваемых снимков, м			ПР сравниваемых снимков, м		
	250–375	375–500	250–500	250–375	375–500	250–500
Средняя величина различий в значениях модальной ориентации разрывов, градусы	8	10	10	8	9	6
СКО различий в значениях модальной ориентации разрывов, градусы	8	10	10	8	9	8
Минимальное различие, градусы	0	0	0	0	0	0
Максимальное различие, градусы	44	45	44	53	57	52
Доля случаев с различием значений модальной ориентации более 30°, %	1.3	3.8	6.4	2.1	3.4	2.1
Количество квадратов, участвовавших в расчете	77			144		

расчетное значение модальной ориентации разрывов оставалось неизменным. Наряду с этим были и случаи, где указанная величина существенно менялась даже при снижении ПР на 125 м.

При мореплавании разрывы считаются попутными, если их направление отличается от генерального курса судна не более, чем на 30° (Фролов, 2001). Поэтому в табл. 1 также приводится обеспеченность случаев, когда различие в определении модальной ориентации разрывов по спутниковым снимкам с разным ПР является наиболее существенным, т.е. превосходит эту величину. Как видно из данных таблицы, число таких случаев невелико и составляет 1–6% от общего количества исследованных квадратов в море Лаптевых и 2–3% в Восточно-Сибирском море. Анализ квадратов, в которых различие в определении модальной ориентации разрывов по снимкам с разным ПР превысило 30°, показал, что наиболее частой причиной значительного расхождения полученных значений является существование в квадратах двумодального распределения ориентации разрывов с близкими величинами обеспеченности первого и второго модального интервалов. При расчетах по данным, полученным со снимка с одним ПР, одно из двух преобладающих направлений принималось за первую моду, а при расчетах при другом ПР это же направление принималось за вторую моду. В редких случаях модальное направление разрывов в квадрате бывает слабо выражено, и обеспеченность модального интервала составляет около 30% (заметим, что при полностью равновероятном распределении ориентации разрывов в квадрате обеспеченность любого направления при задаваемой величине модального интервала 40° равна 22.2%). При этом также может возникнуть большое различие в рассчитанных значениях модальной ориентации разрывов, т.к. ее выделение в данном случае носит условный характер. Однако частота таких ситуаций крайне мала и составляет менее 1%.

Таким образом, в обоих рассмотренных морях изменение ПР снимков ИСЗ даже в 2 раза не приводит к существенным различиям в значениях определяемой по ним модальной ориентации разрывов. Следовательно, преобладающее направление разрывов в ледяном покрове является характеристикой, не зависящей от ПР снимка ИСЗ.

Другой не менее важной характеристикой разрывов является их удельная длина, представляющая собой меру плотности разрывов в пространстве. Удельная длина численно равна суммарной протяженности разрывов на площади 1 км² и выражается в м/км².

Диапазон полученных в ходе расчетов значений удельной длины разрывов достаточно широк. При ПР снимка 250 м ее значения в квадратах сетки Восточно-Сибирского моря варьируют от 12 до 227 м/км². Очевидно, что оперировать абсолютными значениями удельной длины разрывов при анализе ее изменений в большом количестве квадратов не представляется возможным. Например, уменьшение удельной длины на 10 м/км² для квадрата с ее начальным значением 20 м/км² весьма существенно, а в квадрате, где величина удельной длины составляла 200 м/км², такое понижение можно считать незначительным. По этой причине в дальнейшем при оценке изменений плотности разрывов везде будет использоваться ее относительная величина, т.е. изменение по отношению к начальному значению, и выражаться в %.

В отличие от модальной ориентации удельная длина разрывов в подавляющем большинстве случаев существенно понижается при уменьшении ПР снимка. На снимке с ПР 375 м фиксируется в среднем на 21–25% меньше суммарной протяженности разрывов по сравнению с определенной по снимку с ПР 250 м (табл. 2). При дальнейшем уменьшении ПР с 375 до 500 м рассчитан-

Таблица 2. Сравнение значений удельной длины разрывов, полученных по данным снимков ИСЗ с разным ПР

Характеристики	Море Лаптевых			Восточно-Сибирское море		
	ПР сравниваемых снимков, м			ПР сравниваемых снимков, м		
	250–375	375–500	250–500	250–375	375–500	250–500
Средняя величина понижения удельной длины разрывов, %	25	30	48	21	29	44
СКО понижения удельной длины разрывов, %	14	16	15	14	15	14
Минимальное понижение удельной длины разрывов, %	0	0	9	0	0	0
Доля случаев с незначительным понижением удельной длины разрывов, %	12	4	0	15	5	2
Максимальное понижение удельной длины разрывов, %	60	68	80	59	62	75
Доля случаев с понижением удельной длины разрывов более чем в 2 раза, %	4	9	42	2	6	31
Коэффициент корреляции	0.86	0.84	0.75	0.91	0.89	0.88
Уравнение аппроксимации	$l_{250} = 1.112l_{375} + 13.82$	$l_{375} = 1.053l_{500} + 14.74$	$l_{250} = 1.209l_{500} + 28.76$	$l_{250} = 1.106l_{375} + 13.96$	$l_{375} = 1.162l_{500} + 15.15$	$l_{250} = 1.394l_{500} + 24.03$
Средняя ошибка аппроксимации, %	16	16	20	15	17	19
СКО ошибки аппроксимации, %	12	14	17	14	17	25
Количество квадратов, участвовавших в расчете	77			144		

ная удельная длина разрывов понижается в среднем еще на 30%. СКО в обоих случаях составило около 15%. Тем не менее существовали квадраты, в которых при уменьшении ПР на 125 м значение удельной длины разрывов изменилось незначительно или осталось прежним. Их доля от общего числа рассмотренных квадратов мала (2%). Причиной неизменности значений удельной длины разрывов при понижении ПР снимка является отсутствие разрывов с шириной $d < 375$ м или $d < 500$ м. Незначительное уменьшение удельной длины (менее чем на 5%) при понижении ПР снимков с 250 до 375 м было выявлено в 12 и 15% квадратов в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском соответственно. При понижении ПР на такую же величину с 375 до 500 м удельная длина изменяется более существенно, и доля квадратов, в которых не произошло существенного уменьшения плотности разрывов, составила всего 4–5% от общего их числа. Наряду с этим встречались случаи, когда уменьшение ПР снимка на 125 м приводило к снижению удельной длины разрывов более чем в 2 раза (59–68%).

При сравнительном анализе значений удельной длины разрывов, рассчитанных по снимкам с ПР 250 и 500 м, в море Лаптевых случаев с незначительным ее изменением уже выявлено не было, а в Восточно-Сибирском море доля таких случаев составила всего 2%. В среднем суммарная протяженность дешифрируемых разрывов в квадрате при уменьшении ПР снимка на 250 м понизилась

на 48 и 44% соответственно в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском при такой же величине СКО, как и в случае уменьшения ПР на 125 м.

Коэффициенты корреляции между значениями удельной длины разрывов, рассчитанными при различном ПР снимков, высокие и составляют более 0.75. Оценка коэффициентов корреляции с помощью критерия Стьюдента показала, что они являются значимым при доверительной вероятности 0.99. Это позволило аппроксимировать связь между значениями удельной длины разрывов, получаемыми со снимков с разным ПР, уравнениями регрессии.

Полученные уравнения (см. табл. 2) дают возможность сделать надежную оценку плотности разрывов, которая была бы получена со снимка с ПР 250 м, по результатам дешифрирования снимка с меньшим ПР. Сопоставление значений удельной длины разрывов, полученных при дешифрировании снимков с ПР 250 м, со значениями, рассчитанными по уравнениям аппроксимации по данным снимков с меньшим ПР, показало, что в среднем величина получаемой ошибки составляет 15–20%. Установлено, что значения удельной длины разрывов, полученные при ПР снимка 375 м, примерно в 1.3 раза меньше соответствующего значения, рассчитанного по данным снимка с ПР 250 м. В свою очередь, удельная длина разрывов, определенная по снимку с ПР 500 м, в среднем в 1.4 раза ниже ее значения, вычисленного по снимку с ПР 375 м. Рассчитанная по снимку с ПР

500 м удельная длина разрывов в среднем в 1.7–1.9 раза меньше, чем при определении ее по снимку с ПР 250 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пространственное разрешение снимка ИСЗ, безусловно, оказывает влияние на получаемую величину плотности дешифрируемых на нем разрывов в ледяном покрове.

Найдены уравнения регрессии между значениями удельной длины разрывов, полученными по данным снимков с различным ПР для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского.

Полученные линейные уравнения позволят в дальнейшем объединять при расчетах данные по разрывам, полученные со снимков с разным ПР.

Преобладающее направление разрывов, полученное по данным снимков с различным пространственным разрешением, остается неизменным.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках целевой научно-технической программы Росгидромета на 2020–2024 гг. “Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты (криосферы), процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными

сооружениями для Арктики и технологий гидрометеорологического обеспечения потребителей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Пяткин В.П.* Космический мониторинг ледяных полей Арктики и Антарктики // *ГЕО-СИБИРЬ*. 2010. Т. 1. № 3. С. 153–160.
- Бушуев А.В., Бычкова И.А., Григорьев А.В., Захваткина Н.Ю., Лошилов С.Л., Масанов А.Д., Смирнов В.Н., Фролов С.В., Юлин А.В., Александров В.Ю.* Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под ред. В.Г. Смирнова. Санкт-Петербург: ААНИИ, 2011. 240 с.
- Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н.* Метод диагностики и среднесрочного прогноза разрывов в ледяном покрове Карского моря // *Труды ААНИИ*. 2001. Т. 443. С. 94–102.
- 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 со спутников Земли “Метеор” и “NOAA” // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 2. С. 59–67.
- Фролов С.В., Клячкин С.В.* Учет влияния ориентации разрывов в ледяном покрове на скорость движения судна во льдах // *Труды ААНИИ*. 2001. Т. 443. С. 103–111.
- Gorunov 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.

Influence of the Spatial Resolution of Satellite Images on the Obtained Values of the Characteristics of Leads in the Ice Cover of the Arctic Seas

L. N. Dyment¹, P. V. Aksenov¹, S. M. Losev¹, and V. S. Porubaev¹

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

The values of the characteristics of leads in the ice cover of the Laptev and East Siberian seas calculated from satellite images with spatial resolution of 250, 375 and 500 m are compared. It is shown that the modal orientation of leads practically does not depend on the spatial resolution of images. It is established that there is a good relationship between the values of the spatial density of leads calculated from the data of images of different resolutions. Regression equations are obtained that allow us to estimate the values of the specific length of leads with a width of 250 m or more from images with lower spatial resolution.

Keywords: satellite images, spatial resolution, leads in the ice cover

REFERENCES

- Asmus V.V., Krovotyntsev V.A., Pyatkin V.P.* Kosmicheskiy monitoring ledyanyh poley Arktiki i Antarktiki [Space monitoring of Arctic and Antarctic ice fields] // *GEO-SIBIR*. 2010. V. 1. № 3. P. 153–160 (In Russian).
- Bushuev A.V., Bychkova I.A., Grigor'ev A.V., Zakhvatkina N.Yu., Loschilov S.L., Masanov A.D., Smirnov V.N., Frolov S.V., Yulin A.V., Aleksandrov V.Yu.* Sputnikovye metodyopredeleniya harakteristikledyanogo pokrova morey [Satellite methods for determining the characteristics of the sea ice cover] / Pod red. V.G. Smirnova. Sankt-Peterburg: AANII, 2011. 240 p. (In Russian).
- Frolov S.V., Klyachkin S.V.* Uchet vliyaniya orientatsii razryvov v ledyanom pokrove na skorost' dvizheniya sudna vo l'dah [Accounting for the effect of orientation of leads in the ice cover on the speed of the ship in the ice] // *Trudy AANII*. 2001. V. 443. P. 103–111 (In Russian).
- Gorunov 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.
- Gorunov Yu.A., Losev S.M., Dyment L.N.* Metod diagnostiki i srednesrochnogo prognoza razryvov v ledyanom pokrove Karskogo morya [Method of diagnostics and medium-term forecast of leads in the Kara sea ice cover] // *Trudy AANII*. 2001. V. 443. P. 94–102 (In Russian).
- Losev S.M., Gorunov Yu.A., Dyment L.N.* Otsenka harakteristik razryvov v ledyanom pokrove morya Laptevyy po snimkam samoletnogo radiolokatora bokovogo obzora i snimkam so sputnikov Zemli “Meteor” i “NOAA” [Assessment of the characteristics of leads in the Laptev sea ice cover from side-view aircraft radar images and images from the “Meteor” and “NOAA” satellites] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2003. № 2. P. 59–67 (In Russian).