

Изучение дрейфа айсбергов у побережья Северной Земли весной 2018 г. с помощью спутниковой информации

© 2019 г. И.А. Бычкова*, В.Г. Смирнов

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

*bychkova@aari.ru

The iceberg drift study near Severnaya Zemlya in the spring of 2018 by remote sensing data

I.A. Bychkova*, V.G. Smirnov

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*bychkova@aari.ru

Received September 23, 2018 / Revised January 31, 2019 / Accepted March 22, 2019

Keywords: Arctic seas, icebergs, iceberg drift, Severnaya Zemlya, space monitoring, visible spectral range.

Summary

The movement of icebergs in the Laptev Sea off the coast of the Severnaya Zemlya archipelago in spring of 2018 was analyzed using satellite observations in visible spectral band. As is shown in the article the data of radiometers installed on the Landsat-8 and Sentinel-2 satellites allow monitoring of iceberg drifting in spring period in the above Arctic region. Thus, in March–April 2018, the total amount of icebergs detected near the archipelago was 4917. 4161 icebergs were in the landfast ice, 722 ones were drifting with the ice fields, and the other 32 were aground in ice fields. The average length of the icebergs was equal to 88 m; the largest of the recognized icebergs was located in the landfast ice near the ice shelf of the Matusevich fjord and it was 1240 m in length. The maximum speed of drift of the icebergs, as determined by the satellite data, was equal to 29.5 km/day. This was estimated for the situation when the speed of the near-water (surface) wind reached 20 m/s and larger. The purpose of the work was to study drifting of icebergs in order to define more exactly dynamics of the iceberg movement in this poorly known area of the Arctic. It is found that in a case of the consolidated ice cover the drift speed of ice fields with the icebergs involved depends on the driving wind force and direction. According to mean speeds of movement all icebergs were separated into three groups: the icebergs of the coastal zone with velocities smaller 1 km/day; the icebergs of the transition zone at speeds of 1.3 to 1.6 km/day; and the icebergs of the transit zone with speeds larger 2 km/day. The characteristics of the iceberg drifts obtained on the basis of daily satellite monitoring can be used in regional iceberg drift models to ensure safe economic activity on the Arctic shelf. Also, they can find application in engineering calculations in the design of infrastructure facilities on the shelf of the Arctic seas.

Citation: Bychkova I.A., Smirnov V.G. The iceberg drift study near Severnaya Zemlya in the spring of 2018 by remote sensing data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (3): 377–387. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-411>.

Поступила 23 сентября 2018 г. / После доработки 31 января 2019 г. / Принята к печати 22 марта 2019 г.

Ключевые слова: айсберги, арктические моря, видимый диапазон, дрейф айсбергов, Северная Земля, спутниковый мониторинг.

Обсуждаются результаты спутникового мониторинга айсбергов, находившихся в сплочённом ледяном покрове у побережья Северной Земли в марте–апреле 2018 г. Показано, что айсберги вместе с ледяными полями перемещались на северо-запад из моря Лаптевых в Арктический бассейн, причём скорость перемещения зависела от скорости приводного ветра. Приведены траектории 50 айсбергов по наблюдениям за 1–3,5 месяцев.

Введение

Хозяйственная деятельность на акватории арктических морей сопряжена с повышенным риском ввиду влияния опасных ледяных образований на суда и стационарные инженерные сооружения. Айсберги относятся к категории наиболее распространённых опасных ледяных образований Арктики, причём характеристики айсбергов —

преобладающие пространственные размеры, скорость и направление дрейфа — существенно отличаются для разных регионов. Знание статистических параметров айсбергов в конкретном регионе и организация спутникового мониторинга айсберговой угрозы позволяют, используя систему управления ледовой обстановкой, минимизировать риск столкновения с айсбергами судов и объектов инженерной инфраструктуры [1–5].

Северная Земля находится в районе прохода крупных судоходных трасс, в частности, Северного морского пути. На шельфе архипелага расположены перспективные на углеводороды лицензионные участки, освоение которых намечено на ближайшие годы. В то же время данных наблюдений за айсбергами в этом регионе недостаточно для построения гидродинамических моделей, способных прогнозировать перемещение и трансформацию айсбергов в целях ледового менеджмента для предотвращения айсберговых угроз. В частности, дрейф айсбергов вдоль побережья Северной Земли в настоящее время достаточно мало изучен. В апреле–августе 2014–2015 гг. ПАО НК «Роснефть» организовало экспедиции, одной из целей которых была оценка скоростей дрейфа айсбергов в Карском море и море Лаптевых у Северной Земли с помощью радиомаяков. Наиболее длительная серия наблюдения за айсбергом длилась 120 суток. В итоге были получены следующие скорости дрейфа айсбергов: в море Лаптевых 0,09 м/с (2014 г., 23 мая) и 0,18 м/с (2015 г., 31 мая), а в Карском море – 0,16 м/с (12 мая) [6].

Использование спутниковых наблюдений для мониторинга айсбергов не требует специализированных экспедиционных работ с установкой радиомаяков на айсберги. В то же время применение некоммерческой спутниковой информации видимого диапазона позволяет оценить дрейф айсбергов, избегая высоких затрат на экспедиционные работы и покупку дорогостоящих радиолокационных данных высокого разрешения. Однако применение спутниковых данных видимого диапазона для оценки дрейфа айсбергов целесообразно только для весеннего периода, когда в Арктике отмечаются минимальная облачность и высокая естественная освещённость. В другие сезоны облачная ситуация не позволяет получать информативные снимки айсбергов с достаточной временной дискретностью.

Материалы наблюдений

Для наблюдения за дрейфом айсбергов в работе использованы снимки панхроматического канала спектрометра OLI спутника Landsat-8 (разрешение 15 м, полоса обзора 185 км) и снимки мультиспектральной камеры MSI спутника Sentinel-2 (разрешение 10 м, полоса обзора

290 км). Первый снимок района наблюдений в 2018 г. выполнен 7 марта спутником Landsat-8, в это время солнечная освещённость была достаточна для выполнения съёмки. Айсберги, обнаруженные на снимках в марте–апреле, включали в шейп-файл айсбергов каждый со своим уникальным номером. Дублирование в шейпе одного и того же айсберга под разными номерами на снимках за разные даты исключалось. Снимки, полученные в мае–июле, использовали только для мониторинга дрейфа айсбергов, обнаруженных ранее, в марте–апреле.

Всего было проанализировано 62 снимка Landsat-8, в том числе 15 – за март, 35 – за апрель, 6 – за май, по 3 – за июнь и июль 2018 г. С Sentinel-2 было использовано 73 фрагмента спутниковых изображений, выкладываемых в постоянной нарезке на сайте проекта Copernicus. Снимки Sentinel-2 получены с 11 марта по 30 мая 2018 г., в том числе 18 фрагментов за 10 дней марта, 48 – за 20 дней апреля, 7 фрагментов – за 6 дней апреля. В итоге дискретность последовательной съёмки одного и того же айсберга (с учётом облачных ситуаций) составила от нескольких часов до десяти суток. Наименее обеспеченным информацией оказалось начало апреля. Покрытие района исследований спутниковой съёмкой, проведённой весной 2018 г. в малооблачных условиях, показано на рис. 1. Для анализа зависимости дрейфа айсбергов от ветровой ситуации привлекались данные метеонаблюдений на ледовой базе ААНИИ «Мыс Баранова» на Северной Земле.

Методы мониторинга айсбергов у Северной Земли весной 2018 г.

Обнаружение айсбергов на спутниковых снимках проводилось по методике, апробированной авторами в 2010-х годах для акваторий арктических морей и реализованной в дальнейшем в виде технологии обнаружения айсбергов по спутниковым радиолокационным изображениям и изображениям в оптическом спектральном диапазоне [1, 3]. В основе этой методики лежит расчёт статистических характеристик поля яркости на снимке с оценкой среднего значения сигнала μ , среднего квадратического отклонения сигнала σ и их отношения σ/μ в скользящем окне

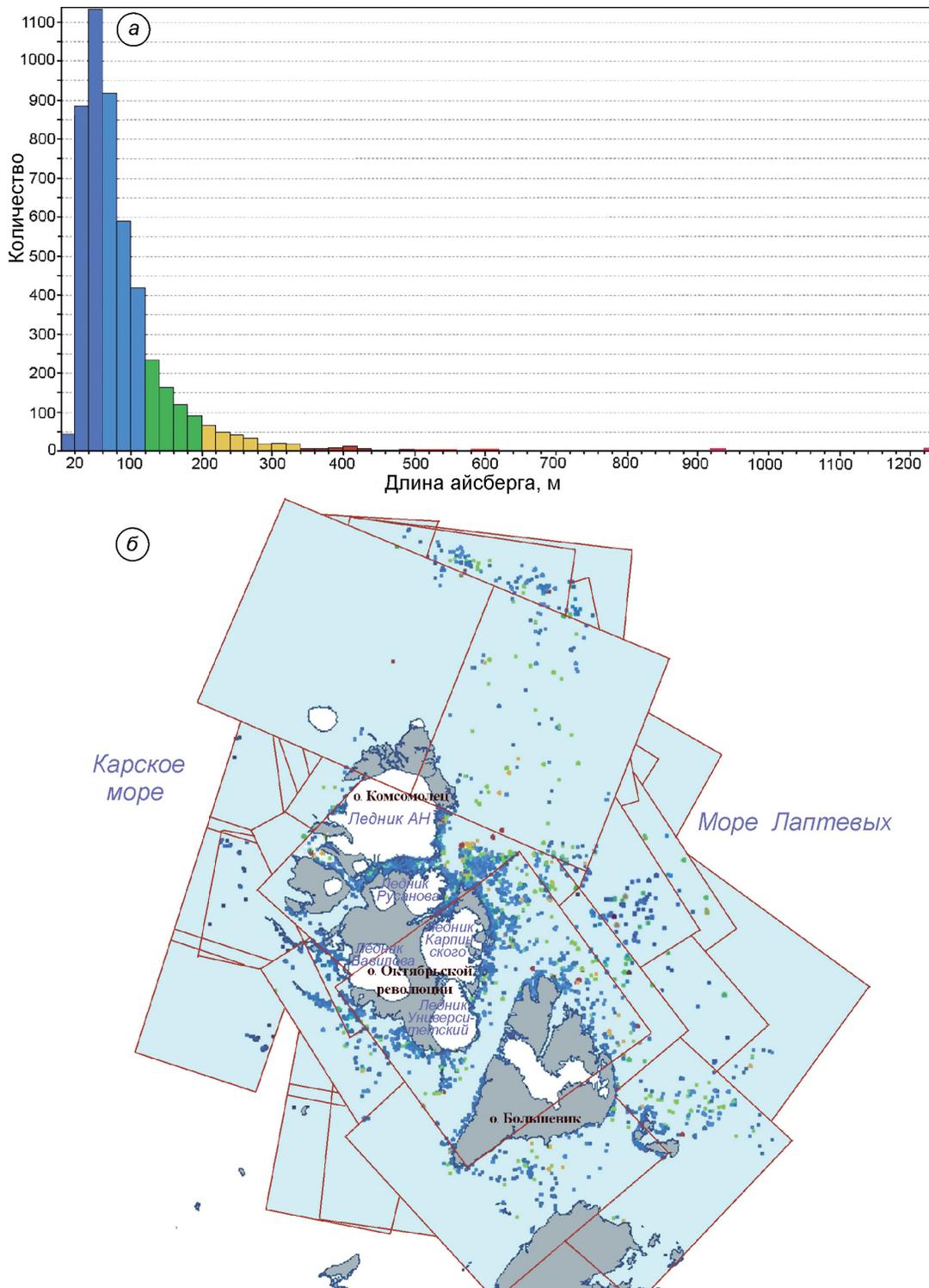


Рис. 1. Спутниковый мониторинг айсбергов у Северной Земли весной 2018 г.

a – гистограмма распределения длины айсбергов, обнаруженных на спутниковых снимках у Северной Земли в марте–апреле 2018 г.; *b* – покрытие акватории вокруг Северной Земли съёмкой с Landsat-8 и Sentinel-2, март–апрель 2018 г. Разноцветными точками на рис. 1, *b* обозначены обнаруженные айсберги, цвет соответствует градациям длины, выделенным цветом на рис. 1, *a*

Fig. 1. Satellite monitoring of icebergs near the Severnaya Zemlya in the spring 2018.

a – the histogram of the lengths distribution of iceberg detected using satellite imagery in March–April 2018; *b* – Landsat-8 and Sentinel-2 coverage of the area around the Severnaya Zemlya in March–April 2018. Multi-colored points designate in Fig. 1, *b* the detected icebergs, color corresponds to the color gradation of the iceberg length specified in Fig. 1, *a*

3×3 пикселя. По полученным значениям σ/μ строится кумулятивная гистограмма. По точке на гистограмме, соответствующей переходу кумулятивной кривой к «насыщению», определяется пороговое значение $\sigma/\mu_{кр}$, используемое в дальнейшем для выделения всех объектов, границы которых состоят из связанных пикселей, имеющих значения $\sigma/\mu > (\sigma/\mu)_{кр}$. Далее в интерактивном режиме выполняется выбраковка ложных объектов (судов и пр.). Выходная продукция применяемой технологии – шейп-файл обнаруженных айсбергов, содержащий сведения об их геометрических размерах.

Цель настоящей работы – исследование перемещения дрейфующих айсбергов. Для идентификации уже обнаруженных айсбергов на последующих снимках составляли шаблоны формы объектов. В шаблоне учитывались пространственные размеры, форма айсберга, рисунок поверхности, высота тени. Для айсбергов, перемещающихся группами, дополнительно учитывалось взаимное расположение объектов в группе. Последний критерий – не главный при идентификации объектов в случае интенсивных подвижек льда, когда взаимное расположение объектов может измениться. Шаблоны составлялись лишь для айсбергов длиной 100 м и более, так как при пространственном разрешении 15 м форма таких айсбергов может быть описана достаточно точно. Самый большой из наблюдавшихся дрейфующих айсбергов имел длину 616 м.

Геометрические размеры айсбергов определялись по снимкам с помощью программы анализа спутниковых изображений Iceberg2, разработанной в ААНИИ [4]. Длина объекта в этой программе рассчитывается как наибольшее расстояние между его граничными точками, а за ширину принимается наибольший отрезок, перпендикулярный длине. Геометрическим центром айсберга считается положение середины отрезка, рассматриваемого в качестве ширины объекта на снимке. Расчётные географические координаты айсберга соответствуют положению рассчитанного таким образом его геометрического центра. Скорость перемещения айсбергов оценивалась по расстоянию между геометрическими центрами одного и того же айсберга на последовательных снимках. Расстояние определялось в программе ArcGIS. Погрешность такого расчёта скорости перемещения зависит от

точности позиционирования объекта на снимке d и от точности определения центра айсберга s . Величина d оценивалась путём сопоставления расхождения в географической привязке одного и того же объекта на разных снимках. В качестве реперных объектов выбраны хорошо идентифицируемые объекты береговой линии. Анализ показал, что величина s может быть принята равной одному пикселю. Погрешность определения центра айсберга зависит от некоторых искажений геометрических очертаний айсберга на снимке при визировании его под различными углами и может достигать $1/4$ расчётной ширины объекта l . Суммарная погрешность определения расстояния между центрами айсберга на последовательных снимках составляет $2(d + 0,25l)$. Для айсбергов шириной 100 м погрешность определения расстояния между одним и тем же айсбергом на последовательных снимках Landsat-8 составит 80 м. Погрешность расчёта скорости перемещения такого айсберга при дискретности снимков одни сутки равна 0,1 см/с, а при дискретности 0,2 сут. – 0,5 см/с.

Результаты исследований

В итоге спутникового мониторинга у берегов Северной Земли в марте–апреле 2018 г. обнаружен 4921 объект, идентифицированный как опасное ледяное образование. Четыре из них с учётом дополнительной информации (материалы прошлых лет, топография дна и пр.) учтены как стабухи, а оставшиеся 4917 – как айсберги. Средняя длина айсберга, определённая по снимкам, составила 88 м; самый большой из айсбергов, обнаруженный в припае у шельфового ледника фьорда Матусевича, имел длину 1240 м. Из обнаруженных айсбергов 4161 (84,6%) находились в припае, 722 (14,7%) дрейфовали вместе с дрейфующим льдом, 32 (0,7%) стояли на мели в дрейфующих льдах. Распределение айсбергов по акватории приведено на рис. 2. Отдельные айсберги в период наблюдений неоднократно переходили из разряда дрейфующих в припайные и обратно. Это объясняется тем, что дрейфующие вблизи берега ледяные поля в море Лаптевых периодически примыкают к припаю, образуя с ним на некоторое время единое целое. Затем, под влиянием ветро-волновых процессов, происходит откол примкнувшей

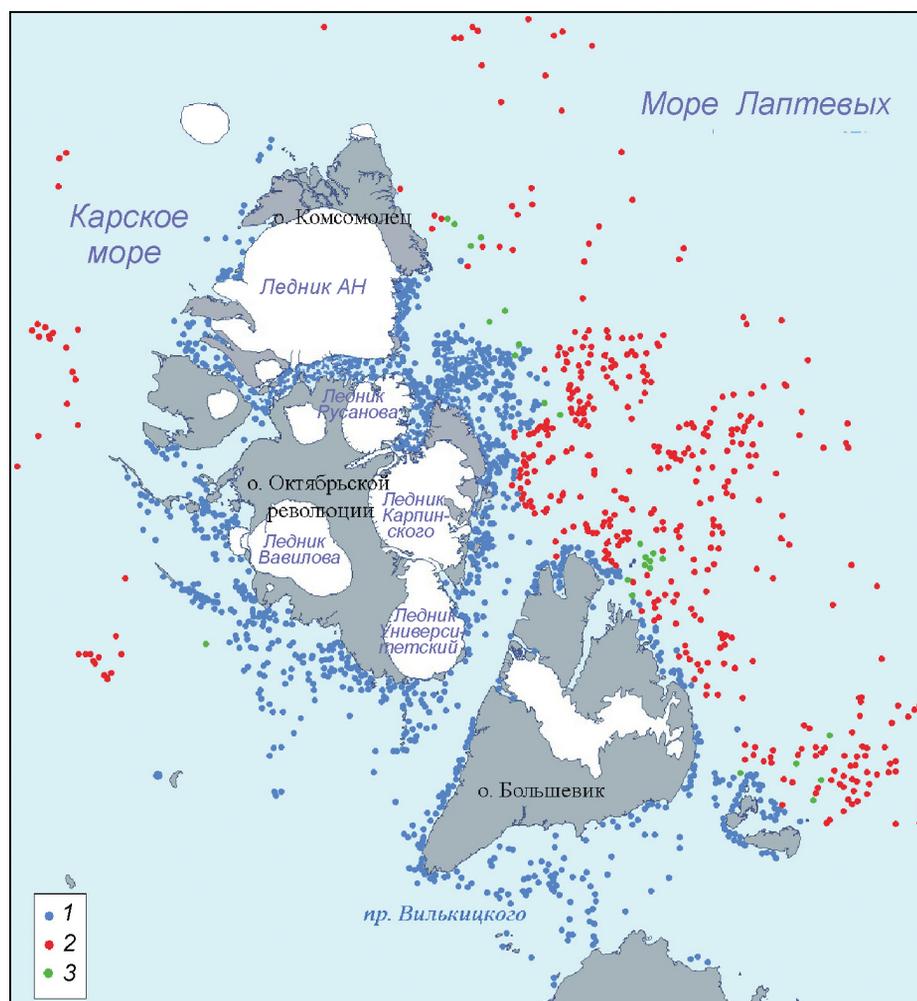


Рис. 2. Айсберги, обнаруженные у Северной Земли в марте–апреле 2018 г. по снимкам Landsat-8 и Sentinel-2:

айсберги, находящиеся: 1 – в припае; 2 – в дрейфующем льду; 3 – на грунте среди дрейфующих льдов

Fig. 2. The icebergs detected near the Severnaya Zemlya in March–April 2018 using Landsat-8 and Sentinel-2 imagery: icebergs: 1 – in the fast ice; 2 – icebergs in the drifting ice; 3 – grounded icebergs among the drifting ice

к припаю льдины, которая снова начинает дрейф вместе с находящимися на ней айсбергами.

На открытой воде в марте–апреле 2018 г. дрейфующие айсберги у берегов Северной Земли обнаружены не были. В июне часть акватории, примыкающая к архипелагу, освободилась ото льда, соответственно часть дрейфующих айсбергов могла оказаться на открытой воде. Однако в этот период в регионе преобладала облачная погода, и за июнь–июль было получено лишь три информативных спутниковых кадра видимого диапазона. Такая дискретность спутниковых наблюдений не позволила выполнить мониторинг айсбергов на водной поверхности, освободившихся от «ледового плена». Айсберги, продолжавшие летом дрейф среди льдов в северной части района исследований, удалось обнаружить. На рис. 3 приведены полученные траектории 50 наблюдавшихся айсбергов. В таблице даны оценки параметров дрейфа айсбергов. По-

казанная на рис. 3 батиметрия района нанесена по данным, опубликованным в статье [7].

По спутниковым снимкам выполнен статистический анализ перемещения айсбергов у Северной Земли. Айсберги, дрейфовавшие у западного побережья архипелага (см. рис. 2), были немногочисленны, отличались малыми размерами и высокой среднесуточной скоростью дрейфа (10 км/сут.). Эти результаты близки к данным, полученным в экспедиции ПАО «НК «Роснефть» 2014–2015 гг. (13,8 км/сут.) [6]. Проследить дрейф айсбергов в Карском море по спутниковым снимкам удалось лишь за несколько дней; айсберги перемещались в юго-западном направлении, после чего исчезали из поля зрения (в выбранном районе прибрежного мониторинга). Айсберги, дрейфовавшие в море Лаптевых, удалось проследить на протяжении 1–3,5 месяцев. По скорости дрейфа эти айсберги можно разделить на три группы: транзитной зоны, прибрежной зоны, переходной зоны.

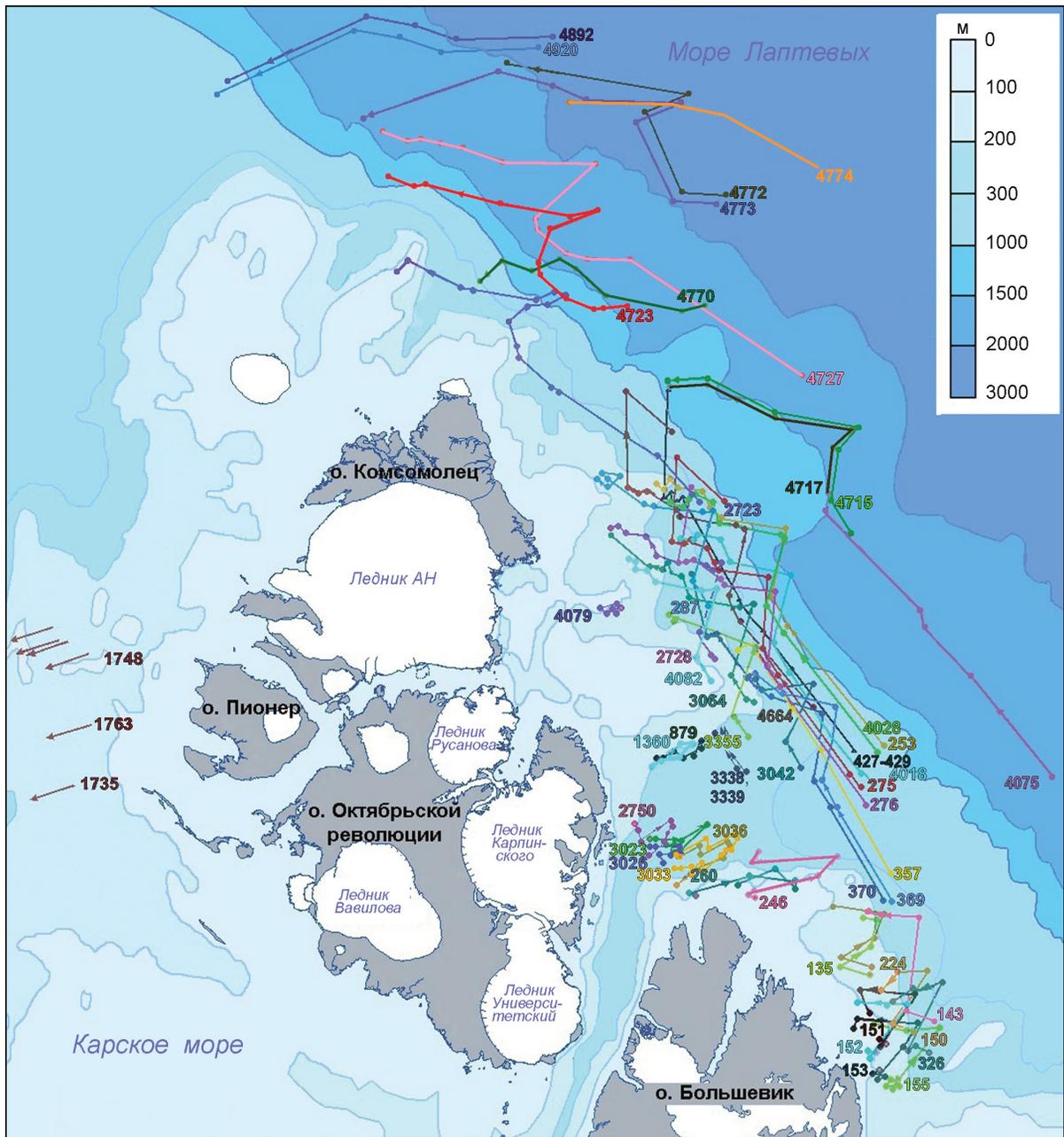


Рис. 3. Дрейф некоторых крупных айсбергов у Северной Земли весной 2018 г. Порядковый номер айсберга, присвоенный ему при мониторинге, даётся в точке первого обнаружения этого айсберга
Fig. 3. The drift of some large icebergs near the Severnaya Zemlya in the spring 2018. The sequence number of the iceberg assigned to it during monitoring is given at the point of the first detection of this iceberg

Айсберги *транзитной зоны* дрейфовали на глубинах свыше 200–300 м и имели наиболее высокие средние скорости перемещения – 2–6,8 км/сут. Скорость дрейфа айсбергов возрастала при переходе на большие глубины. Более высокие скорости дрейфа отмечались у айсбергов, двигавшихся на глубинах свыше 1,5 км (айсберги 4075, 4076, 4716 и др. в таблице и на рис. 3). Все эти айсберги

дрейфовали преимущественно в северо-западном направлении. Айсберги, обнаруженные севернее архипелага (№ 4723, 4727, 4772–4774, 4892, 4920 на рис. 3), огибали Северную Землю, перемещаясь на запад со скоростью до 6,8 км/сут.

Айсберги *прибрежной зоны* перемещались рядом с припаем в мелководной зоне и дрейфовали как на северо-запад и северо-восток, так и

Параметры айсбергов, дрейфовавших в море Лаптевых у Северной Земли весной 2018 г.

Номер айсберга	Размеры айсберга, м, длина/ширина	Период наблюдения (число дней слежения)	Суммарное перемещение, км	Скорость, км/сут		Число фиксаций на снимках
				средняя	максимальная	
135	279/122	7.03–14.04(38)	45,9	1,2	5,45(10–12.04*)	7
143	370/186	7.03–16.04(40)	79,2	1,8	5,5(10–12.04)	7
153	230/215	7.03–6.05(60)	71,7	1,19	5,7(10–12.04)	12
155	190/60	7.03–29.04(53)	63,4	1,2	7,45(10–12.04)	11
246	616/222	12.03–30.05(79)	86	1,09	5,85(10–12.04)	16
253	230/150	12.03–20.05(69)	174,5	2,53	21,6(20–22.03)	20
260	427/180	12.03–20.05(69)	77,2	1,1	29,0(10.04)	18
275	594/294	12.03–21.6(101)	211	2,09	20,05(20–22.03)	25
287	200/150	29.03–20.05(52)	110,4	2,12	7,7(14–17.04)	11
369	520/360	12.03–27.04(46)	125,3	2,7	5,8(5–7.04)	11
879	250/215	13.03–20.05(68)	39	0,57	26,5(10.04)	22
2723	390/130	13.03–30.04(48)	192	4	18,9(20–21.03)	29
2728	190/120	18.03–20.07(124)	94,7	0,8	6,7(14–17.04)	20
2750	240/125	7.04–20.05(43)	34	0,54	24(10.04)	15
3023	320/207	13.03–20.05(68)	53,4	0,85	21(10.04)	19
3033	190/90	18.03–20.05(63)	69,6	1,1	22,5(10.04)	20
3064	330/212	13.03–10.6(89)	124	1,39	8,5(8–10.04)	24
3338	300/200	13.03–10.6(89)	30	0,34	1,9(7–12.04)	12
4075	275/172	12.03–27.04(46)	149,4	3,25	12,6(22.03)	7
4079	512/255	7.04–20.07(104)	22	0,21	2,4(18–20.05)	13
4715	225/130	22.03–15.05(54)	151,4	2,8	15,9(22.03)	15
4723	180/120	27.03–30.04(34)	173,3	5,1	13,8(15–17.04)	13
4727	230/180	17.03–3.05(48)	277,8	5,8	8,6(17–27.03)	13
4774	380/290	10.04–15.05(35)	109,3	3,1	3,95(10–21.04)	4
4892	120/100	12.04–3.05(21)	142	6,8	10,5(27.05–3.05)	5

*В скобках указаны даты наблюдения максимальной скорости.

на юго-запад. Средняя скорость перемещения айсбергов этой зоны составила менее 1 км/сут., хотя в отдельные дни при сильных ветрах скорость дрейфа на порядок возрастала. Временами эти айсберги застревали в припае и в целом за период наблюдений продвинулись лишь незначительно вдоль берега Северной Земли. Айсберги № 3023, 3033 и 3036, например, за два месяца наблюдений большую часть времени дрейфовали на юго-запад, в сторону пролива Шокальского, и только в первой половине дня 10 апреля при сильном юго-западном ветре (с порывами до 21 м/с) за пять часов переместились на северо-восток на 4,2–4,5 км. После этого скорость их дрейфа резко снизилась, а направление движения изменилось на противоположное.

Айсберги *переходной зоны* дрейфовали на северо-запад на глубинах 100–200 м, имея среднюю скорость 1,3–1,6 км/сут.; при выходе на

мелководье скорость дрейфа айсбергов резко падала, в ряде случаев они садились на грунт.

Обсуждение

В марте–апреле 2018 г. по сравнению с аналогичным сезоном 2017 г. по спутниковым данным зарегистрирована большая доля дрейфующих айсбергов по отношению к общему числу айсбергов, обнаруженных у берегов Северной Земли. Если в 2017 г. дрейфовало среди льдов 6,9% айсбергов, то в 2018 г. – 14,7%. Число айсбергов, выявленных на снимках в 2018 г., также было выше, чем в 2017 г. Однако необходимо учитывать, что в 2017 г. при оценке использовались только данные Landsat-8, а в 2018 г. привлекались также данные Sentinel-2, имеющие лучшее пространственное разрешение (10 м).

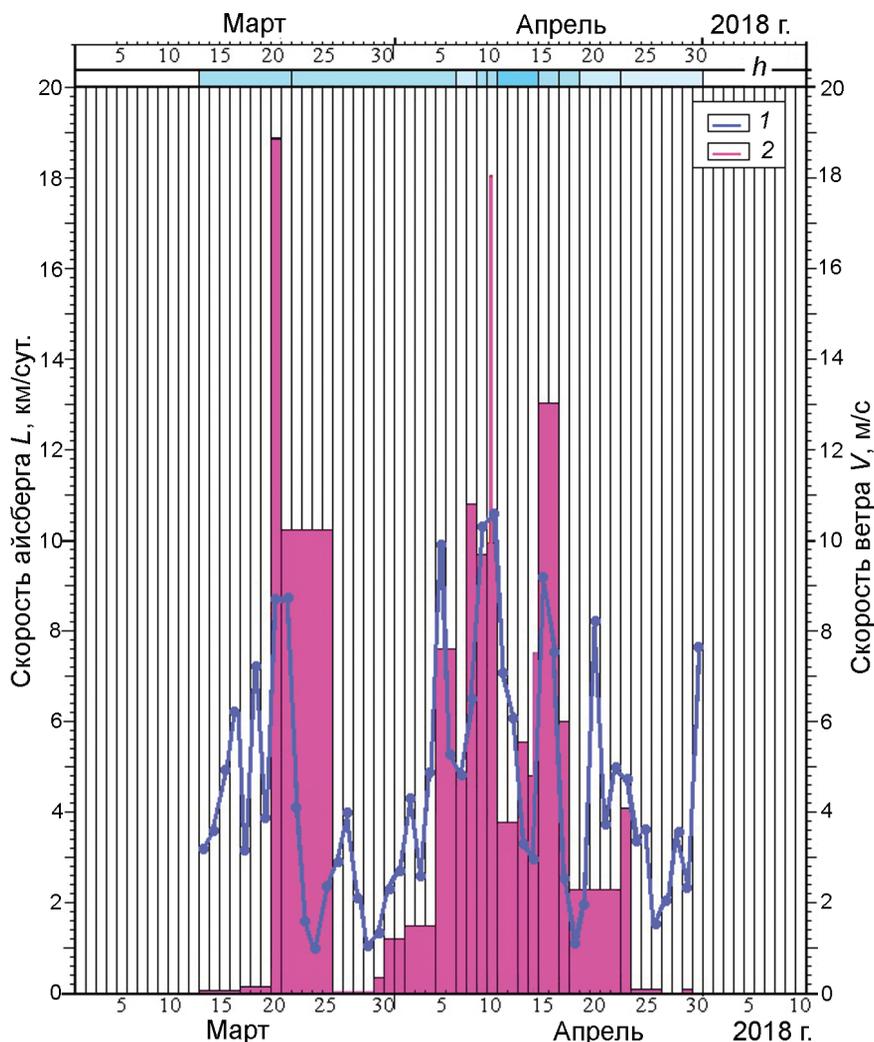


Рис. 4. Скорость айсберга транзитной зоны № 2723 и среднесуточная скорость приводного ветра в марте–апреле 2018 г. на станции «Мыс Баранова»:

1 – среднесуточная скорость приводного ветра; 2 – средняя скорость айсберга за период между последовательными фиксациями его на снимках. Промежуток времени между двумя ближайшими информативными снимками соответствует одному столбцу диаграммы. Шкала *h* показывает глубины (м) в месте нахождения айсберга в день наблюдения; значения цветовой градаций шкалы приведены на рис. 3

Fig. 4. The speed of the iceberg in the transit zone № 2723 and average daily surface wind speed in March–April 2018 at the «Cape Baranova» base.

1 – average daily surface wind speed; 2 – average speed of the iceberg for the period between its successive fixations. The time interval between the two nearest informative images corresponds to one column of the chart. The scale *h* shows the depth (m) at the iceberg location for every day of observation; the values of the color gradations of the scale are shown in Fig. 3

Более высокое пространственное разрешение позволило обнаружить больше мелких айсбергов (длиной около 20 м). Средний размер айсберга, обнаруженного в 2018 г., составил 88 м против 91 м в 2017 г. Увеличение числа объектов наблюдения – дрейфующих айсбергов – на снимках 2018 г. способствовало получению статистически более обоснованных оценок дрейфа.

Для айсбергов транзитной и переходной зон отмечена статистически значимая зависимость скорости дрейфа от скорости приводного ветра. На рис. 4 график скорости дрейфа айсберга № 2723 весной 2018 г. сопоставлен с изменением скорости ветра на ледовой базе «Мыс Баранова» и изменением глубины нахождения айсберга по траектории следования. Расчёт коэффициента корреляции скорости дрейфа айсберга и скорости приводного ветра, выполненный для периода 20 марта – 23 апреля, дал значение $r = 0,68$.

Период после 23 апреля в оценке корреляции не учитывался, так как в указанный период айсберг был вынесен в мелководную зону (до 100 м глубины), сел на мель и раскололся на две части. Период 13–19 марта также не учитывался ввиду отсутствия информативных спутниковых кадров за эти дни.

Зима 2017/18 г. по метеоусловиям была типичной для моря Лаптевых. В этот период здесь преобладают южные ветры, что способствует выносу дрейфующих льдов в Арктический бассейн [8, 9]. По данным наблюдений метеостанции ледового стационара «Мыс Баранова» в марте преобладали юго-восточные ветры с эпизодическими переходами к северо-востоку. В апреле воздушные потоки были преимущественно юго-западных направлений с кратковременным изменением на юго-восток. Такие процессы обусловили результирующий дрейф льдов у восточного побережья Северной Земли в

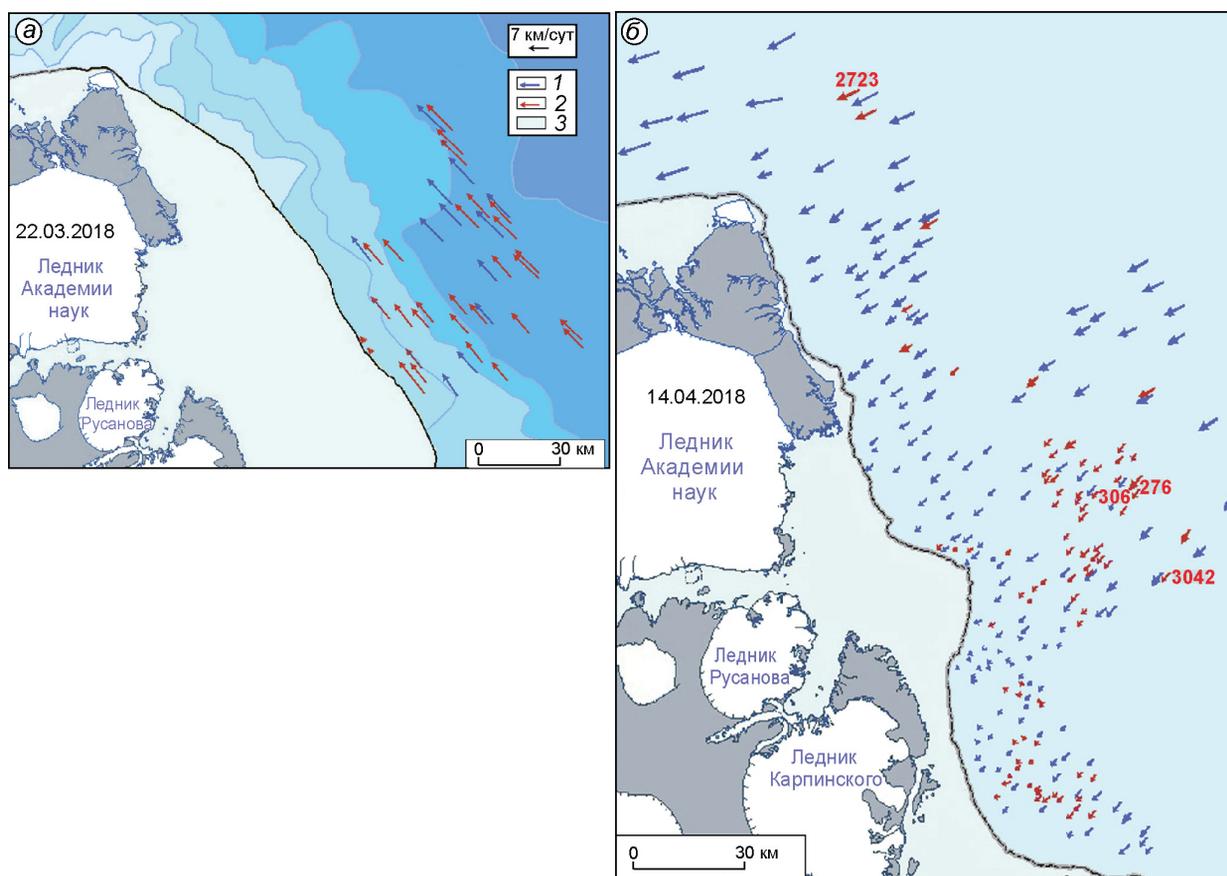


Рис. 5. Дрейф ледяных полей и айсбергов в море Лаптевых у побережья Северной Земли по данным Landsat-8:

a – 22.3.2018; *б* – 14.4.2018; 1 – перемещение ледяных полей за сутки; 2 – перемещение айсбергов за сутки; 3 – припай. Цветовые градации шкалы батиметрии соответствуют приведённым на рис. 3

Fig. 5. Drift of ice floes and icebergs in the Laptev Sea off the coast of the Severnaya Zemlya according to Landsat-8 observations:

a – 22.3.2018; *б* – 14.4.2018; 1 – movement of ice fields for the day; 2 – movement of iceberg for the day; 3 – fast ice area

северо-западном направлении в сторону Арктического бассейна.

Спутниковый мониторинг выполнялся в марте–апреле 2018 г. В этот период айсберги у Северной Земли дрейфовали в сплочённом ледяном покрове. По последовательным снимкам Landsat-8, полученным с интервалом одни сутки, выполнена оценка скорости дрейфа льда и айсбергов. Для определения перемещения ледяных полей в период между двумя снимками на изображении экспертным путём определялись характерные точки поля (точки перегиба по периметру полей, торосы, разводья) и производился поиск этих точек на следующем снимке. В итоге, оценённый таким образом дрейф айсбергов (скорость и направление) совпал с дрейфом ледяных полей. Примеры оценки по последовательным

спутниковым данным видимого диапазона ежесуточного перемещения айсбергов и ледяных полей приведены на рис. 5. Полученные векторы дрейфа не охватывают всю область наблюдения, так как необходимое условие для расчёта – отсутствие облачности на двух последовательных снимках, снятых с интервалом одни сутки.

По материалам ледовых карт ААНИИ сплочённость льдов в море Лаптевых в этот период составляла 10 баллов, в ледяном покрове преобладал однолетний лёд (градации толщины: «тонкий» и «толстый»). Ранее К. Эйк [10] установил, что при высокой сплочённости льда (более 90%), причём достаточно толстого, собственное движение айсберга блокируется ледяным полем, в котором он находится, и айсберг дрейфует со скоростью этого ледяного поля.

Скорость дрейфа ледяных полей и айсбергов, перемещавшихся с ними совместно, зависела не только от силы ветра, но и от его направления. Минимальные скорости (1–2 км/сут. и менее) были характерны для нажимных ветров (см. рис. 5, б), при которых ледяные поля в прикромочной области надвигались на припай. В результате происходила трансформация ледяного покрова, потеря энергии при столкновении отдельных ледяных полей. Максимальные скорости дрейфа отмечены в ситуациях, когда вектор дрейфа ледяных полей и айсбергов был параллелен изобатам склона глубин, отделяющего глубоководную зону моря (см. рис. 5, а). В этом случае происходило сложение однонаправленных составляющих дрейфа, обусловленных силой ветра и течения.

Как следует из таблицы, наибольшие скорости дрейфа льда (выше 20 км/сут.), отмечены 20–23 марта и 10 апреля 2018 г. В первую половину дня 10 апреля максимальная скорость дрейфа ледяных полей и айсбергов составляла 29,5 км/сут. Полученные оценки средней скорости дрейфа ледяных полей близки к результатам, ранее установленным авторами [11] для моря Лаптевых по спутниковым радиолокационным данным с разрешением 150 м в марте 2008 г.: 1–2 см/с (0,86–1,72 км/сут.). Скорость дрейфа ледяных полей определялась в работе [11] на основании анализа перемещения особенностей ледяных полей на последовательных снимках. В то же время определение средней скорости дрейфа на основании данных радиомаяков (с дискретностью один час) за три года наблюдений, выполненное в ходе экспедиций ПАО «НК «Роснефть», дало на порядок большие величины.

Измерения 2013–2015 гг. позволили сделать вывод, что «средняя скорость дрейфа ледяных полей на акваториях морей Карского и Лаптевых практически не меняется и составляет 16–17 см/с (13,8–14,7 км/сут.)» [6]. Отметим, что расхождение в оценках скоростей дрейфа ледяных полей связано в основном с различной дискретностью спутниковых наблюдений и наблюдений с использованием радиомаяков, а также различием в периоде наблюдения. Если спутниковый мониторинг выполнялся в весеннее время, когда сплочённость ледяного покрова максимальна, то измерения с помощью радиомаяков [6] проводили в мае–августе, уже после разрушения при-

пая. Для корректного сравнения спутниковых данных с данными радиомаяков необходим спутниковый мониторинг дрейфующих айсбергов в летний период (в том числе дрейф на открытой воде). В условиях Арктики, учитывая высокую долю облачности в летний период, решить такую задачу можно только с привлечением радиолокационных спутниковых данных.

Выводы

Спутниковый мониторинг айсбергов, дрейфовавших в сплочённом ледяном покрове в марте–апреле 2018 г. у Северной Земли, показал, что дрейф айсбергов совпадал с дрейфом ледяных полей. И айсберги, и ледяные поля при господствовавших в этот период ветрах южных направлений перемещались на северо-запад – из моря Лаптевых в Арктический бассейн.

По средней скорости дрейфа айсберги могут быть разделены на три группы: айсберги прибрежной зоны со скоростями менее 1 км/сут.; айсберги переходной зоны со скоростями 1,3–1,6 км/сут.; айсберги транзитной зоны со скоростями более 2 км/сут. Максимальная средняя скорость дрейфа айсбергов зафиксирована на глубоководных участках севернее архипелага и составила 6,8 км/сут.

Для айсбергов, перемещавшихся на глубинах свыше 200 м, отмечена значимая корреляционная зависимость перемещения айсберга от скорости приводного ветра. Максимальная скорость дрейфа айсбергов, определённая по спутниковым данным, составила 29,5 км/сут. и была получена в ситуации, когда скорость приводного ветра достигала 20 м/с и более.

Характеристики дрейфа айсбергов, полученные на основании ежесуточного спутникового мониторинга, могут быть использованы в региональных моделях дрейфа айсбергов, что позволит повысить достоверность прогностических оценок дрейфа, а также применяться в инженерных расчётах при проектировании объектов инфраструктуры на шельфе арктических морей. Организация спутникового мониторинга с использованием не только радиолокационных данных, но и снимков видимого диапазона позволит уточнить представление о динамике ледяных полей и айсбергов в малоизученных районах Арктики.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-60124, анализ ледовых и ветровых условий, и грант № 18-05-60109, обнаружение айсбергов и изучение их дрейфа).

Acknowledgements. The work was supported by Russian Foundation of Basic Research (grants № 18-05-60124, analysis of ice and wind conditions, and № 18-05-60109, detection of icebergs and study of their drift).

Литература

References

1. Бычкова И.А., Смирнов В.Г. Использование спутниковой информации для обнаружения айсбергов и оценки айсберговой угрозы // Лёд и Снег. 2018. № 4. С. 537–551.
2. Кулаков М.Ю., Демчев Д.М. Моделирование дрейфа айсбергов как часть ледового мониторинга в Западной Арктике // Метеорология и гидрология. 2015. № 12. С. 47–55.
3. Миронов Е.У., Смирнов В.Г., Бычкова И.А., Кулаков М.Ю., Демчев Д.М. Новые технологии обнаружения айсбергов и прогнозирования их дрейфа в западном секторе Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 2 (104). С. 21–32.
4. Обнаружение по спутниковым данным опасных ледяных образований вблизи инженерных объектов хозяйственной деятельности на шельфе арктических морей. Методическое пособие / Ред. В.Г. Смирнов. СПб.: ААНИИ, 2017. 76 с.
5. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Ред. В.Г. Смирнов. СПб.: ААНИИ, 2011. 239 с.
6. Бузин И.В., Миронов Е.У., Сухих Н.А., Павлов В.А., Корнишин К.А., Ефимов Я.О. Исследования дрейфа ледяных образований на шельфе Российской Арктики с помощью автоматических радиомаяков спутниковой системы ARGOS // Науч.-техн. вестн. ОАО «НК «Роснефть». 2016. Вып. 45. № 4. С. 4–9.
7. Janout M.A., Hölemann J., Timokhov L., Gutjahr O., Heinemann G. Circulation in the northwest Laptev Sea in the eastern Arctic Ocean: crossroads between Siberian river water, Atlantic water and polynya formed dense water // Journ. of Geophys. Research. Oceans. 2017. V. 122. P. 6630–6647. doi: 10.1002/2017JC013159.
8. Карклин В.П., Карелин И.Д. Сезонная и многолетняя изменчивость характеристик ледового режима морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М.: МГУ, 2009. С. 187–201.
9. Janout M., Hölemann J., Krumpfen T. Cross-shelf transport of warm and saline water in response to sea ice drift on the Laptev Sea shelf // Journ. of Geophys. Research. Oceans. 2013. V. 118 (2). P. 563–576. doi: 10.1029/2011JC007731.
10. Eik K. Iceberg drift modelling and validation of applied metocean hindcast // Cold Regions Science and Technology. 2009. V. 57. № 2/3. P. 67–90.
11. Selyuzhenok V., Mahoney A., Krumpfen T., Castellani G., Gerdes R. Mechanisms of fast-ice development in the south-eastern Laptev Sea: a case study for winter of 2007/08 and 2009/10 // Polar Research. 2017. V. 36. № 1. 1411140. doi: 10.1080/17518369.2017.1411140.
1. Bychkova I.A., Smirnov V.G. Use of space information for iceberg detection and iceberg threat assessment. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018, 4: 537–551. [In Russian].
2. Kulakov M.Yu., Demchev D.M. Simulation of Iceberg Drift as a Part of Ice Monitoring in the West Arctic. *Meteorologiya i Gidrologiya. Meteorology and Hydrology*. 2015, 12: 47–55. [In Russian].
3. Mironov E.U., Smirnov V.G., Bychkova I.A., Kulakov M.Yu., Demchev D.M. New technologies for detecting icebergs and predicting their drift in the Western sector of Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Problems*. 2015, 2 (104): 21–32. [In Russian].
4. *Obnaruzhenie po sputnikovym dannym opasnykh ledyanikh obrazovaniy vblizi inzhenernykh ob'ektov khozyaistvennoy deyatel'nosti na shelfe arkticheskikh morey. Detection of dangerous ice features near the arctic shelf engineering constructions with the use of satellite imagery: A methodical manual*. Ed. by V.G. Smirnov. St. Petersburg: AARI, 2017: 76 p. [In Russian].
5. *Sputnikovye metody opredeleniya kharakteristik ledyanogo pokrova morey. Satellite methods to determine the characteristics of the ice cover of the seas*. Ed. by V.G. Smirnov. St. Petersburg: AARI, 2011: 239 p. [In Russian].
6. Buzin I.V., Mironov E.U., Sukhikh N.A., Pavlov V.A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O. Study of ice drift features on the Russian Arctic Offshore with the help of automatic radio beacons based on the ARGOS satellite system. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik OAO «NK «Rosneft»*. Rosneft Oil Company Journ. of Science and Technology. 2016, 45 (4): 4–9. [In Russian].
7. Janout M.A., Hölemann J., Timokhov L., Gutjahr O., Heinemann G. Circulation in the northwest Laptev Sea in the eastern Arctic Ocean: crossroads between Siberian river water, Atlantic water and polynya formed dense water // Journ. of Geophys. Research. Oceans. 2017, 122: 6630–6647. doi: 10.1002/2017JC013159.
8. Karklin V.P., Karelin I.D. Seasonal and long-term variability of the ice conditions in the Laptev and East-Siberian Seas. *Systema morya Laptevykh i prilegayushchikh morey Arktiki: Sovremennoe sostoyanie i istoriya razvitiya. System of the Laptev Sea and the Adjacent Arctic Seas: Modern and Past Environments*. Moscow: Moscow University Press, 2009: 187–201. [In Russian].
9. Janout M., Hölemann J., Krumpfen T. Cross-shelf transport of warm and saline water in response to sea ice drift on the Laptev Sea shelf. Journ. of Geophys. Research. Oceans. 2013, 118 (2): 563–576. doi: 10.1029/2011JC007731.
10. Eik K. Iceberg drift modelling and validation of applied metocean hindcast. Cold Regions Science and Technology. 2009, 57 (2/3): 67–90.
11. Selyuzhenok V., Mahoney A., Krumpfen T., Castellani G., Gerdes R. Mechanisms of fast-ice development in the south-eastern Laptev Sea: a case study for winter of 2007/08 and 2009/10. Polar Research. 2017, 36 (1): 1411140. doi: 10.1080/17518369.2017.1411140.